

**Mikro-Elektrostrukturieren planarer und zylindrischer
Oberflächen mittels strukturierter, flexibler und mehrlagiger
Gegenelektroden mit integriertem fluidischen Kanal**

Dipl.-Ing. Cord Hinrich Winkelmann

Universität Bremen 2014

Mikro-Elektrostrukturieren planarer und zylindrischer Oberflächen mittels strukturierter, flexibler und mehrlagiger Gegenelektroden mit integriertem fluidischen Kanal

Vom Fachbereich 1 für Physik und Elektrotechnik
der Universität Bremen

zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften
(Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Ing. Cord Hinrich Winkelmann

wohnhaft in Oldenburg

Referent:	Prof. Dr.-Ing. Walter Lang
Korreferent:	Prof. Dr.-Ing. Michael J. Vellekoop
Eingereicht am:	27. Februar 2014
Tag des Promotionskolloquiums:	26. Mai 2014

Diese Version der Dissertation wurde gegenüber der eingereichten Version um die Laufzettel zur Herstellung der Gegenelektroden gekürzt.

Also lautet der Beschluss:
Dass der Mensch was lernen muss –
– Nicht allein das A-B-C
Bringt den Menschen in die Höh’;
Nicht allein im Schreiben, Lesen
Übt sich ein vernünftig Wesen;
Nicht allein in Rechnungssachen
Soll der Mensch sich Mühe machen;
Sondern auch der Weisheit Lehren
Muss man mit Vergnügen hören.

Wilhelm Busch, 1865

Kurzfassung

Sensorische Oberflächen sind eine neue Generation von Sensoren für die Anlagenzustandsüberwachung. Anders als herkömmliche Mikro- oder Dünnschichtsensoren werden hier die Sensorstrukturen direkt auf dem zu überwachenden Bauteil hergestellt und nicht wie bisher in Form einzelner Sensoren am Messobjekt angebracht. Durch die Technologien der Mikrosystemtechnik können diese Strukturen sehr stark miniaturisiert werden und die Messungen finden sehr nah am Ursprungsort des Auftretens der physikalischen Größen statt.

Um die mechanische Beständigkeit der Sensorschichten zu erhöhen, sollte der Herstellungsprozess so gestaltet werden, dass die Oberfläche des Bauteils plan bleibt. Neben der Einbettung in eine Isolationsschicht lassen sich Sensoren direkt in der Oberfläche des zu überwachenden Bauteils einbetten. Dazu wird die Oberfläche entsprechend der Sensorgeometrie strukturiert. Diese Dissertation befasst sich mit einem neuartigen Konzept für das Mikro-Elektrostrukturieren. Dabei handelt es sich um ein abtragendes Fertigungsverfahren, mit dem Strukturauflösungen im Mikrometerbereich schnell und kostengünstig hergestellt werden können. Mikro-Elektrostrukturieren eignet sich besonders für gehärtete Stähle, weil es bei Raumtemperatur abläuft und weder thermische Spannungen in das Material eingebracht werden noch die Härte des Stahls vermindert wird.

Die Arbeit beschreibt in einem FEM- und einem analytischen Modell zunächst die theoretischen Grundlagen des Prozesses hinsichtlich der Strukturtiefe und -auflösung. Zudem wird gezeigt, wie eine neuartige Gattung strukturierter Werkzeugelektroden für unterschiedliche Anforderungsprofile hergestellt werden kann. Abschließend werden zahlreiche Strukturierungen vorgenommen, deren Ergebnisse mit den theoretischen Annahmen verglichen werden.

Um das Zusammenspiel der relevanten Einflussparameter wie Stromdichte, Leitfähigkeit und Strömungsgeschwindigkeit des Elektrolyten und Abstand zwischen Werkstück und Werkzeug sowohl auf die resultierende Strukturtiefe als auch die Strukturauflösung besser zu verstehen, werden zwei Modelle entwickelt. Mit dem FEM-Modell lässt sich die Strukturtiefe und die erreichbare Strukturauflösung berechnen. Mit dem analytischen Modell kann der Einfluss der Elektrolytgeschwindigkeit auf die Strukturtiefe bestimmt werden. Beiden Modellen liegt die Annahme zugrunde, dass die Strukturierung bei hohen Stromdichten (über 30 A/cm^2) durchgeführt wird, weil hier der Materialabtrag proportional zur geflossenen Ladung ist. Grundsätzlich lässt sich sagen, dass die Strukturauflösung mit sinkendem Abstand zwischen Werkstück und Werkzeug ebenfalls sinkt. Die Strukturtiefe steigt mit zunehmender Länge des fluidischen Kanals in dessen Verlauf aufgrund der steigenden Metallionenkonzentration an. Dieser Effekt lässt sich durch einen zulaufenden Querschnitt des Kanals, durch den der Elektrolyt kontinuierlich beschleunigt wird, abschwächen. Die Strukturtiefe ist zudem abhängig von der Fläche der Gegenelektrode. Große abzutragende Flächen werden tiefer als kleine Flächen.

Die Herstellung der Werkzeugelektroden erfolgt mit den Technologien der Mikrosystemtechnik. Neu ist, dass der fluidische Kanal direkt in die Gegenelektrode integriert wird. Es werden sowohl starre Gegenelektroden für planare Werkstücke als auch flexible Gegenelektroden für zylindrische Werkstücke hergestellt. Flexible, mehrlagige Gegenelektroden bieten schlussendlich die Möglichkeit, mehrere unterschiedliche Strukturen herzustellen, die mit einer Genauigkeit von $1 \mu\text{m}$ zueinander positioniert werden können.

Die praktischen Ergebnisse der Strukturierung bestätigen die theoretischen Modelle. Der Arbeitsabstand zwischen den Elektroden beträgt etwa $20 \mu\text{m}$. Damit werden Strukturauflösungen von unter $50 \mu\text{m}$ erreicht. Auch bei der Verwendung flexibler Gegenelektroden, bei denen die leitfähigen Schichten 500 nm dick sind, lassen sich Stromdichten von 100 A/cm^2 realisieren. Es lassen sich dreidimensionale Strukturen in wenigen Sekunden auf gekrümmten Oberflächen herstellen. Die typische Prozessdauer für eine etwa $5 \mu\text{m}$ tiefe Struktur liegt bei etwa 20 s und ist unabhängig von der zu strukturierenden Fläche.

Abstract

Sensorial surfaces are a new generation of sensors for the use in condition monitoring. In contrast to conventional micro- or thin-film-sensors the sensor structures of sensorial surfaces are manufactured directly on the part to be monitored and are not mounted as separate sensor modules. By using microsystems technology, the sensor structures can be miniaturized and the measurement data can be gauged very closely to the occurrence of the physical quantity.

To enhance the mechanical durability of the sensor layers, the manufacturing process should result in a completely flat surface. This can be achieved by embedding the sensor layer into an insulation layer or directly into the surface of the part to be monitored. To do this, the surface needs to be structured in the shape of the sensor geometry. This thesis deals with a novel concept for Electrochemical Micro-Machining (EMM). EMM is a method of removing metal locally on the micrometer scale in a quick and cost efficient way. It is especially suited for hardened steels because it is run at room temperature. It does neither bring in thermal stress nor does it reduce the hardness of the steel.

The thesis describes a Finite-Element-Method (FEM) model as well as an analytical model for a better understanding of the theoretical background of the process regarding the depth and resolution of the manufactured structures. Furthermore, the fabrication of a new type of structured counter- (work-) electrode is presented for different applications. The thesis concludes with the presentation of several results of manufactured structures and a comparison of the theoretical models with the practical results.

Two models were developed to understand the influence of relevant parameters like current density, conductivity and velocity of the electrolyte and the distance between the tool and the workpiece on the resulting depth and resolution of the manufactured structures. The FEM model can predict the depth of the structure as well as its resolution. With the analytical model it is possible to investigate the influence of the electrolyte velocity on the structure depth. Both models are based on the assumption, that high current densities (above 30 A/cm^2) are used because the material removal rate is proportional to the amount of charge that is transported between the electrodes in this regime. In general it can be concluded that the lateral resolution decreases as the distance between the electrodes gets smaller. The depth of the structure increases over the length of the fluidic channel due to the metal ion concentration. This effect can be attenuated by using channels that decrease their cross section over their length and thus accelerate the electrolyte. The depth is also dependent on the area of the counter electrode. Larger areas yield in deeper structures.

The new generation of tool electrodes are fabricated with the use of microsystem technologies. The fluidic channel is directly integrated into the electrodes. Rigid electrodes for planar work pieces as well as flexible electrodes for cylindrical work pieces are presented. With flexible, multi-layered electrodes it is possible to produce several different structures that are aligned with an accuracy of $1 \mu\text{m}$.

The practical results of the manufactured structures back the theoretical results of both models. The work distance between the electrodes is $20 \mu\text{m}$ and resolutions of $50 \mu\text{m}$ can be achieved. It is possible to use flexible counter electrodes with 500 nm thick metallic layers at up to 100 A/cm^2 . Three-dimensional structures can be fabricated on cylindrical surfaces in a few seconds. The typical process length for a $5 \mu\text{m}$ deep structure is about 20 s and does not depend on the structured area.

Inhaltsverzeichnis

Nomenklatur	xiii
1. Einleitung	1
1.1. Sensorische Oberflächen	1
1.1.1. Anwendungsbeispiele für sensorische Oberflächen	4
1.2. Sensoreinbettung	5
1.2.1. Einbettung in die Isolationsschicht	7
1.2.2. Einbettung in die Oberfläche	10
1.3. Fertigungsverfahren	12
1.3.1. Thermisches Abtragen	13
1.3.1.1. Funkenerosives Abtragen	13
1.3.1.2. Laserstrahl-Sublimierschneiden	15
1.3.2. Chemisches Abtragen	17
1.3.3. Elektrochemisches Abtragen	18
1.3.3.1. Elektrochemisches Ätzen (Metallätzen)	18
1.3.3.2. Elektrochemisches Formabtragen	18
1.4. Aufbau der Arbeit	25
2. Modellierung	26
2.1. FEM-Simulation	27
2.1.1. Geometrie	28
2.1.2. Physik-Module	29
2.1.3. Netz	32
2.1.4. Solver	32
2.1.5. Ergebnisse	33
2.1.5.1. Strukturprofil	34
2.1.5.2. Strukturauflösung	41
2.2. Analytisches Modell	46
2.2.1. Geschwindigkeitskomponenten	48
2.2.2. Ionenbewegung im Kanal	52
2.2.3. Auszählung der Ionen	53
2.2.4. Ergebnisse	57
2.2.4.1. Kanäle mit konstanter Breite	57
2.2.4.2. Kanäle mit variabler Breite	60
2.3. Designregeln	62

3. Gegenelektroden	64
3.1. Planare Gegenelektroden	64
3.2. Flexible Gegenelektroden	66
3.3. Mehrlagige Gegenelektroden	68
4. Strukturierung	71
4.1. Aufbau	71
4.1.1. Mechanisch-fluidischer Aufbau	73
4.1.1.1. Aufnahme für Axial-Lagerring	73
4.1.1.2. Aufnahme für Radial-Lagerring	76
4.1.1.3. Aufnahme für mehrlagige Gegenelektroden auf planaren Substraten	76
4.1.2. Elektrische Ansteuerung	78
4.1.3. Elektrodendesigns	79
4.2. Ergebnisse	81
4.2.1. Strukturprofil	82
4.2.2. Auflösungsvermögen	86
4.2.3. Sensorstrukturen	93
5. Zusammenfassung und Ausblick	101
A. Anhang	103
A.1. Charakterisierung des sensorischen Lagers	103
A.1.1. Aufbau- und Verbindungstechnik	103
A.1.2. Messaufbau	103
A.1.3. Messergebnisse	103
A.2. Quellcodes	105
A.2.1. Analytisches Modell	105
A.3. Simulationsergebnisse FEM	112
A.3.1. Strukturprofil	112
A.3.2. Strukturauflösung	130
A.4. Laufzettel	137
A.4.1. Sensorisches Lager	138
A.5. Füllung des fluidischen Kanals mit Metallionen	142
A.6. Elektronik	144
Eigene Veröffentlichungen	154
Danksagung	155

Abbildungsverzeichnis

1.1. Technologisches Umfeld sensorischer Oberflächen.	2
1.2. Einbettungsvarianten für Sensorelemente.	6
1.3. Mit sensorischer Oberfläche ausgestattetes Axial-Zylinderrollenlager. . . .	7
1.4. Einbettung eines Sensors in die Isolationsschicht.	8
1.5. Detailaufnahmen der Sensorstrukturen auf einem sensorischen Lager. . . .	9
1.6. Oberflächenprofil einer eingebetteten Sensorstruktur.	10
1.7. Einbettung eines Sensors in die Oberfläche.	11
1.8. Fertigungsverfahren nach DIN 8580 und DIN 8590.	13
1.9. Funktionsweise und Ergebnis des funkenerosiven Abtragens.	14
1.10. Funktionsweise und Ergebnisse der Laserablation.	16
1.11. Klassisches Modell zur Metallauflösung.	19
1.12. Mikro-Elektrostrukturieren mit Maske aus Photoresist auf dem Werkstück.	20
1.13. Maskenloses Mikro-Elektrostrukturieren.	22
1.14. Mikro-Elektrostrukturieren mit strukturierter Gegenelektrode.	24
2.1. Gegenseitige Beeinflussung der Prozessparameter.	27
2.2. Schematische Darstellung des Kanals mit Definition der Arbeitsebene. . .	29
2.3. Kanalgeometrie und Parameter in <i>COMSOL Multiphysics</i>	30
2.4. Simulationsergebnis Strukturprofil, Kanalhöhe $h_{Kanal} = 20\text{ }\mu\text{m}$	35
2.5. Simulationsergebnis Strukturprofil, Kanalhöhe $h_{Kanal} = 50\text{ }\mu\text{m}$	36
2.6. Simulationsergebnis Strukturprofil, Kanalhöhe $h_{Kanal} = 100\text{ }\mu\text{m}$	37
2.7. Strukturprofile im direkten Vergleich.	38
2.8. Lösungsrate der Metallionen K_c in Abhängigkeit von der Kanalhöhe. . . .	40
2.9. $K_F = F_S \cdot h_{Kanal}$ in Abhängigkeit von der Kanalhöhe.	41
2.10. $K_{cF} = K_c/K_F$ in Abhängigkeit von der Kanalhöhe.	42
2.11. Simulationsergebnis Strukturauflösung, Kanalhöhe $h_{Kanal} = 20\text{ }\mu\text{m}$	43
2.12. Simulationsergebnis Strukturauflösung, Kanalhöhe $h_{Kanal} = 50\text{ }\mu\text{m}$	44
2.13. Simulationsergebnis Strukturauflösung, Kanalhöhe $h_{Kanal} = 100\text{ }\mu\text{m}$	45
2.14. Strukturprofile im direkten Vergleich.	46
2.15. Reduzierung der Einflussparameter.	47
2.16. Zerlegung des Kanals in einzelne Streifen.	48
2.17. Laminare Strömung in einem Rohr mit kreisförmigem Querschnitt.	50
2.18. Analogie zwischen fluidischem und elektrischem Widerstand.	50
2.19. Schematische Darstellung des Kanals mit den Geschwindigkeitskomponenten.	52
2.20. Weg der Ionen durch den Kanal.	54
2.21. Rastereinteilung des Kanals.	54

2.22. Darstellung der normierten Ionenverteilung.	55
2.23. Darstellung der relativen Ionenverteilung.	56
2.24. Resultierender Graben.	57
2.25. Berechnungsergebnis Strukturprofil, Kanalhöhe $h_{Kanal} = 20 \mu\text{m}$	58
2.26. Berechnungsergebnis Strukturprofil, Kanalhöhe $h_{Kanal} = 50 \mu\text{m}$	58
2.27. Berechnungsergebnis Strukturprofil, Kanalhöhe $h_{Kanal} = 100 \mu\text{m}$	59
2.28. FEM- und analytisches Modell im direkten Vergleich.	60
2.29. Schematische Darstellung eines Kanals mit zulaufendem Querschnitt.	61
2.30. Berechnungsergebnis Strukturprofil, Kanalbreite verengend.	62
2.31. Berechnungsergebnis Strukturprofil, Kanalbreite erweiternd.	63
3.1. Herstellung planarer, starrer Gegenelektroden.	65
3.2. Herstellung flexibler, einlagiger Gegenelektroden.	67
3.3. Herstellung flexibler, mehrlagiger Gegenelektroden.	69
4.1. Blockdiagramm des Strukturieraufbaus.	72
4.2. Strukturierereinrichtung mit Halterung für flexible Gegenelektroden.	72
4.3. Aufbau der Halterung für planare Gegenelektroden.	74
4.4. Aufbau der Halterung für flexible Gegenelektroden.	75
4.5. Aufbau der Halterung für mehrlagige Gegenelektroden.	77
4.6. Schaltbild für die Prozesssteuerung.	77
4.7. Gegenelektroden vom Typ 1.	79
4.8. Gegenelektroden vom Typ 2 bzw. 3.	80
4.9. Gegenelektroden vom Typ 4.	80
4.10. Gegenelektroden vom Typ 5.	81
4.11. Gegenelektroden vom Typ 6.	81
4.12. REM-Aufnahme vom Anfangsbereich eines strukturierten Grabens.	82
4.13. Detailaufnahme einer hergestellten Struktur.	83
4.14. Ergebnis Strukturierung mit Gegenelektrode Typ 1a.	84
4.15. Ergebnis Strukturierung mit Gegenelektrode Typ 2a.	86
4.16. Ergebnis Strukturierung mit Gegenelektrode Typ 3a.	87
4.17. Mikroskopische Aufnahme zur Untersuchung des Auflösungsvermögens.	87
4.18. Ergebnis Strukturierung mit Gegenelektrode Typ 1b.	89
4.19. Ergebnis Strukturierung mit Gegenelektrode Typ 2b.	90
4.20. REM-Aufnahme einer strukturierten Schachbrettstruktur.	91
4.21. Vermessung einer strukturierten Schachbrettstruktur.	92
4.22. Detailaufnahme einer strukturierten Schachbrettstruktur.	92
4.23. Prozentuale Abweichung der Strukturbreiten.	94
4.24. Struktur eines Dehnungsmessstreifens auf einem Wälzlagering.	95
4.25. REM-Aufnahme der DMS-Struktur.	96
4.26. Detailaufnahme der Mäander.	96
4.27. Ergebnis Strukturierung mit Gegenelektrode Typ 5.	97
4.28. Erster Strukturierungsschritt mit mehrlagiger Gegenelektrode.	98
4.29. Zweiter Strukturierungsschritt mit mehrlagiger Gegenelektrode.	99

4.30. Detailaufnahme nach der zweiten Strukturierung.	100
A.1. Schematische Darstellung des Messaufbaus.	104
A.2. Sensorsignal und Signal der Kraftmessdose.	105
A.3. Simulationsergebnis. $H_{Kanal} = 10 \mu\text{m}$, $J = 1 \text{ A/cm}^2$, $p_{in} = 1,0 \text{ bar}$	113
A.4. Simulationsergebnis. $H_{Kanal} = 20 \mu\text{m}$, $J = 1 \text{ A/cm}^2$, $p_{in} = 1,0 \text{ bar}$	114
A.5. Simulationsergebnis. $H_{Kanal} = 50 \mu\text{m}$, $J = 1 \text{ A/cm}^2$, $p_{in} = 1,0 \text{ bar}$	115
A.6. Simulationsergebnis. $H_{Kanal} = 100 \mu\text{m}$, $J = 1 \text{ A/cm}^2$, $p_{in} = 1,0 \text{ bar}$	116
A.7. Simulationsergebnis. $H_{Kanal} = 10 \mu\text{m}$, $J = 2 \text{ A/cm}^2$, $p_{in} = 1,0 \text{ bar}$	117
A.8. Simulationsergebnis. $H_{Kanal} = 20 \mu\text{m}$, $J = 2 \text{ A/cm}^2$, $p_{in} = 1,0 \text{ bar}$	118
A.9. Simulationsergebnis. $H_{Kanal} = 50 \mu\text{m}$, $J = 2 \text{ A/cm}^2$, $p_{in} = 1,0 \text{ bar}$	119
A.10. Simulationsergebnis. $H_{Kanal} = 100 \mu\text{m}$, $J = 2 \text{ A/cm}^2$, $p_{in} = 1,0 \text{ bar}$	120
A.11. Simulationsergebnis. $H_{Kanal} = 10 \mu\text{m}$, $J = 5 \text{ A/cm}^2$, $p_{in} = 1,0 \text{ bar}$	121
A.12. Simulationsergebnis. $H_{Kanal} = 20 \mu\text{m}$, $J = 5 \text{ A/cm}^2$, $p_{in} = 1,0 \text{ bar}$	122
A.13. Simulationsergebnis. $H_{Kanal} = 50 \mu\text{m}$, $J = 5 \text{ A/cm}^2$, $p_{in} = 1,0 \text{ bar}$	123
A.14. Simulationsergebnis. $H_{Kanal} = 100 \mu\text{m}$, $J = 5 \text{ A/cm}^2$, $p_{in} = 1,0 \text{ bar}$	124
A.15. Simulationsergebnis. $H_{Kanal} = 20 \mu\text{m}$, $J = 10 \text{ A/cm}^2$, $p_{in} = 0,2 \text{ bar}$	125
A.16. Simulationsergebnis. $H_{Kanal} = 20 \mu\text{m}$, $J = 10 \text{ A/cm}^2$, $p_{in} = 0,5 \text{ bar}$	126
A.17. Simulationsergebnis. $H_{Kanal} = 20 \mu\text{m}$, $J = 10 \text{ A/cm}^2$, $p_{in} = 1,0 \text{ bar}$	127
A.18. Simulationsergebnis. $H_{Kanal} = 50 \mu\text{m}$, $J = 10 \text{ A/cm}^2$, $p_{in} = 1,0 \text{ bar}$	128
A.19. Simulationsergebnis. $H_{Kanal} = 100 \mu\text{m}$, $J = 10 \text{ A/cm}^2$, $p_{in} = 1,0 \text{ bar}$	129
A.20. Simulationsergebnis. $H_{Kanal} = 20 \mu\text{m}$, $J = 10 \text{ A/cm}^2$, $p_{in} = 0,5 \text{ bar}$	131
A.21. Simulationsergebnis. $H_{Kanal} = 50 \mu\text{m}$, $J = 10 \text{ A/cm}^2$, $p_{in} = 0,5 \text{ bar}$	132
A.22. Simulationsergebnis. $H_{Kanal} = 100 \mu\text{m}$, $J = 10 \text{ A/cm}^2$, $p_{in} = 0,5 \text{ bar}$	133
A.23. Simulationsergebnis. $H_{Kanal} = 20 \mu\text{m}$, $J = 10 \text{ A/cm}^2$, $p_{in} = 1,0 \text{ bar}$	134
A.24. Simulationsergebnis. $H_{Kanal} = 50 \mu\text{m}$, $J = 10 \text{ A/cm}^2$, $p_{in} = 1,0 \text{ bar}$	135
A.25. Simulationsergebnis. $H_{Kanal} = 100 \mu\text{m}$, $J = 10 \text{ A/cm}^2$, $p_{in} = 1,0 \text{ bar}$	136
A.26. Verlauf von Strom und Spannung zur Bestimmung der Ionengeschwindigkeit.	143
A.27. Schaltplan des Wechselschalters	144

Tabellenverzeichnis

1.1. Eigenschaftsvergleich des Mikro-Elektrostrukturierens.	23
2.1. Stufung der verwendeten Prozessparameter.	33
2.2. Metallionenkonzentration $c_{Fe,max}$	39
2.3. Strukturfaktor F_S	39
4.1. Messergebnisse des Schachbrettmusters bei 10 As und 5 As.	94
A.1. Herstellung eines sensorischen Lagers.	138

Nomenklatur

Abkürzungen

DIL	<i>Dual In-Line (Package)</i> , Gehäuseform
DLC	<i>Diamond-Like Carbon</i> , diamantähnlicher amorpher Kohlenstoff
DMS	Dehnungsmessstreifen
EDM	<i>Electro-Discharge-Machining</i> , Funkenerosives Abtragen
EMM	<i>Electrochemical Micro-Machining</i> , Elektrochemisches Mikrostrukturieren
FEM	Finite-Elemente-Methode
INA	<i>Instrumentation Amplifier</i> , Instrumentenverstärker
LiGA	Lithographie, Galvanik und Abformung
MEMS	Mikro-Elektro-Mechanische Systeme
MOSFET	Metall-Oxid-Halbleiter-Feldeffekttransistor
Pt100	Platin-Messwiderstand mit $100\ \Omega$ Widerstand bei $0\ ^\circ\text{C}$
PWM	Pulsweitenmodulation
SOP	<i>Small-Outline-Package</i> , Gehäuseform
TTL	Transistor-Transistor-Logik, Schaltungstechnik für logische Schaltungen

Griechische Symbole

λ	Ionische Leitfähigkeit	$[\text{m}^2\text{S/mol}]$
$\lambda_{\text{Fe}^{3+}}$	Ionische Leitfähigkeit von Fe^{3+}	$[\text{m}^2\text{S/mol}]$
σ	Elektrische Leitfähigkeit	$[\text{S/m}]$
$\sigma_{3\text{M NaNO}_3}$	Elektrische Leitfähigkeit von 3M NaNO_3	$[\text{S/m}]$

Lateinische Symbole

Δp	Druckdifferenz	$[\text{Pa}]$
Δp_v	Druckdifferenz auf Stirnflächen eines Strömungszyinders	$[\text{Pa}]$
\dot{V}	Volumenstrom	$[\text{m}^3/\text{s}]$
η	Dynamische Viskosität	$[\text{Ns}/\text{m}^2]$
μ	Ionenbeweglichkeit	$[\text{m}^2/\text{V/s}]$
τ	Schubspannung	$[\text{Pa}]$
A	Fläche	$[\text{m}^2]$
b_{GE}	Breite der Gegenelektrode	$[\mu\text{m}]$
b_{Kanal}	Breite des fluidischen Kanals	$[\text{mm}]$
c_{0,c_Fe}	Anfangskonzentration von Fe^{3+} am Einlass	$[\text{mol}/\text{m}^3]$
c_{Fe}	Anfangskonzentration von Fe^{3+} im Elektrolyten	$[\text{mol}/\text{m}^3]$
d	Durchmesser	$[\text{m}]$

Tabellenverzeichnis

D_{c_Fe}	Diffusionskoeffizient von Fe^{3+} in Wasser	$[m^2/V/s]$
E	Elektrische Feldstärke	$[V/m]$
$ec.nJ$	Stromdichte senkr. zur Oberfläche (int. <i>COMSOL</i> -Variable)	$[A/m^3]$
F	Faraday-Konstante	$[C/mol]$
F_S	Strukturfaktor	$[1]$
F_{ix}	Kräfte in x -Richtung	$[N]$
h_{Kanal}	Höhe des fluidischen Kanals	$[\mu m]$
i	Indexvariable	$[1]$
J	Elektrische Stromdichte	$[A/m^2]$
j	Indexvariable	$[1]$
K	Korrekturfaktor	$[1]$
k	Indexvariable	$[1]$
K_c	Lösungsrate der Metallionen	$[mol/A]$
K_F	F_S multipliziert mit h_{Kanal}	$[\mu m]$
$K_{abtr.}$	Abtragsfaktor	$[m^3/A/s]$
K_{cF}	K_c geteilt durch K_F	$[mol/A/\mu m]$
$k_{Raster.}$	Anzahl der Koordinatenpaare pro Rasterelement	$[1]$
l	Länge eines Strömungszyinders	$[m]$
l_{GE}	Länge der Gegenelektrode	$[mm]$
l_{Kanal}	Länge des fluidischen Kanals	$[mm]$
m_{Pfade}	Anzahl der Ionenpfade im Verlaufe des Kanals	$[1]$
N	Stoffmenge	$[mol]$
n	Anzahl	$[1]$
N_{0cFe}	Eintrag an Metallionen in den Elektrolyten	$[mol/m^3/s]$
$n_{Koord.}$	Anzahl von Koordinatenpaaren	$[1]$
$n_{Raster.}$	Anzahl von Rasterelementen	$[1]$
p_1	Druck auf linke Seite eines Strömungszyinders	$[Pa]$
p_2	Druck auf rechte Seite eines Strömungszyinders	$[Pa]$
p_{in}	Statischer Druck des Elektrolyten am Einlass des Kanals	$[Pa]$
p_{out}	Statischer Druck des Elektrolyten am Auslass des Kanals	$[Pa]$
r	Radius eines Strömungszyinders	$[m]$
R_{fluid}	Fluidischer Widerstand	$[1/s/m]$
$S_{Ion}(k)$	Anzahl der Metallionen im k -ten Streifen des Kanals	$[1]$
t_P	Gesamtprozesszeit	$[s]$
t_{max}	Zeit, die ein Ion von der Anode zur Kathode benötigt	$[s]$
$t_{Schritt}$	Dauer eines Zeitschritts	$[s]$
U	Elektrische Spannung	$[V]$
U_{Kanal}	Elektrische Spannung zwischen Anode und Kathode	$[V]$
u_{m,c_Fe}	Mobilität von Fe^{3+} in Wasser	$[s\ mol/kg]$
v	Mittlere Strömungsgeschwindigkeit	$[m/s]$
v_y	Wanderungsgeschwindigkeit der Ionen von der Anode zur Kathode	$[m/s]$
$v_{1,max}(x)$	Geschwindigkeit in x -Richtung in der Mitte des Kanals an der Stelle x	$[m/s]$
$V_{m,Fe}$	Molares Volumen von Eisen	$[m^3/mol]$
v_{max}	Maximale Strömungsgeschwindigkeit	$[m/s]$

Tabellenverzeichnis

$v_{x,max}$	Geschwindigkeit in x -Richtung in der Mitte des Kanals an der Stelle x	[m/s]
x	x -Koordinate	[mm]
y	y -Koordinate	[mm]
$y_{Graben}(k)$	Tiefe der Struktur im k -ten Streifen des Kanals	[1]
z	z -Koordinate	[mm]
Z_{c_Fe}	Ladungsnummer von Fe^{3+}	[1]

1. Einleitung

Um die Verfügbarkeit und Nutzungsdauer von Maschinen und Anlagen zu optimieren und damit Kosten zu reduzieren, erwarten deren Nutzer einen immer höheren Grad der Anlagenüberwachung. Diese regelmäßige oder permanente Messung und Analyse physikalischer Größen zur Ermittlung des Zustands einer Maschine oder Anlage wird als *Condition Monitoring* bezeichnet. Die Analyse erhöht die Ausfallsicherheit durch die Bestimmung des Ausfallzeitpunktes von Verschleißteilen, macht die Restlaufzeit einer Anlage bestimmbar und steigert die Betriebssicherheit. Dies führt zu deutlichen Kosteneinsparungen durch die Möglichkeit einer bedarfsgerechten Wartung, der Optimierung der Servicelogistik und des Personalbedarfs sowie geringeren Instandhaltungsmaßnahmen. Die für *Condition Monitoring* bisher eingesetzten Sensoren kommen bei sehr hohen Anforderungen an ihre Grenzen.

Mit sensorischen Oberflächen werden Messaufgaben, für die bisher keine anwendbare Lösung vorlag, im industriellen Umfeld realisierbar. Anders als bisher eingesetzte Mikro- oder Dünnschichtsensoren, bei denen das eigentliche Sensorelement in einem Gehäuse verkapselt und anschließend an der zu überwachenden Anlage befestigt wird, werden sensorische Oberflächen direkt auf dem zu überwachenden Bauteil hergestellt und dadurch in das Material verlagert, wodurch sie Messungen unmittelbar am Ort des Geschehens ermöglichen. Sie sind für extreme mechanische, thermische und chemische Belastungen ausgelegt, bei denen herkömmliche Sensoren versagen. Dadurch wird sowohl die Sicherheit als auch die Maschineneffizienz stark erhöht. Das bedeutet für den Anwender deutliche Kosteneinsparungen beim Betrieb seiner Anlagen, insbesondere unter Berücksichtigung der Gesamtbetriebskosten, weil er von der heute üblichen reaktiven oder präventiven Instandhaltung zu einer zustandsorientierten Instandhaltung übergehen kann.

In den folgenden Abschnitten wird das Konzept der sensorischen Oberflächen anhand von Anwendungsbeispielen und dem derzeitigen Stand der Technik erläutert. Anschließend werden Konzepte vorgestellt, wie Sensorschichten in der Oberfläche eines zu überwachenden Bauteils eingebettet werden können. Dies kann auf verschiedene Arten geschehen, die je nach Anwendungsfall Vor- und Nachteile mitbringen.

1.1. Sensorische Oberflächen

In der Praxis werden für das *Condition Monitoring* zahlreiche Sensoren und Sensorsysteme eingesetzt, die eine Vielzahl von Messungen wie beispielsweise Temperaturmessungen oder die Messung mechanischer Dehnungen ermöglichen. Bei diesen Sensoren handelt es sich hauptsächlich um herkömmliche Mikro- oder Dünnschichtsensoren (siehe Abbildung 1.1). Diese Sensoren sind etabliert, zuverlässig und werden in großen Stückzahlen hergestellt. Damit einhergehend sind diese Sensoren sehr kostengünstig. Sie stoßen jedoch schnell an

1. Einleitung

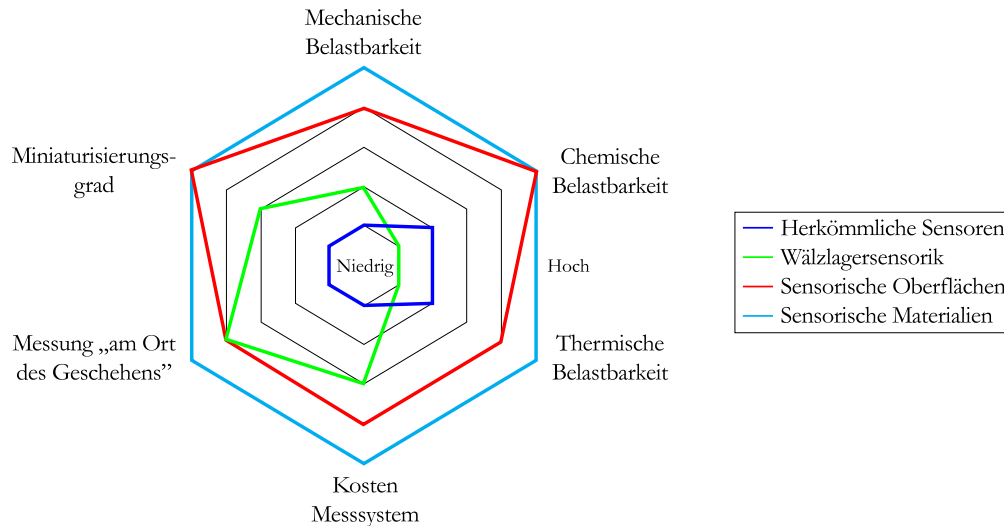


Abbildung 1.1. Technologisches Umfeld sensorischer Oberflächen.

ihre Grenzen, wenn sie höheren mechanischen, chemischen oder thermischen Belastungen ausgesetzt werden. Klassische Mikrosysteme werden zunächst als Chip, meist auf Siliziumbasis, hergestellt und anschließend in einem Gehäuse zum besseren Handling und zum Schutz vor Umwelteinflüssen verpackt. Gängige Gehäuseformen sind *DIL* (*Dual In-Line*)- oder *SOP* (*Small-Outline-Package*)-Gehäuse. Auf diese Gehäuse dürfen keine größeren mechanischen Belastungen ausgeübt werden, sodass sie beispielsweise für Anwendungen im Rollkontakt ungeeignet sind. Hinzu kommt, dass Sensoren auf der Basis von Silizium nur bis etwa 200 °C verwendet werden können, weil sich darüber durch Diffusionseffekte der verwendeten Materialien die elektrischen Eigenschaften des Sensors verändern oder ihn komplett zerstören. Dünnschichtsensoren umgehen diese Probleme teilweise, sind in der Regel aber nicht so stark miniaturisiert. Typische Sensoren dieser Art sind Temperaturfühler (Pt100), Folien-Dehnungsmessstreifen (DMS) oder Drucksensoren, bei denen eine Dünnschicht-Widerstandsbrücke auf einer Membran aufgebracht wurde. Vereinzelt lassen sich diese Sensoren hoch belasten, wie beispielsweise im Falle von Temperatursensoren. Der gleichzeitigen Erfüllung geforderter Eigenschaften, also beispielsweise der Einsatz unter hohen Temperaturen bei simultaner mechanischer Belastung, halten diese Sensoren in der Regel nicht stand. Durch den niedrigen Miniaturisierungsgrad (auch wenn Mikrosysteme hoch integriert sind, so vergeben sie diesen Vorteil durch relativ große Gehäuse) ist es oftmals nicht möglich, direkt am Ort des Geschehens zu messen.

Wälzlagersensoren stehen technologisch zwischen den herkömmlichen Sensoren und den sensorischen Oberflächen. Es handelt sich dabei um eine Mischung aus Dünnschichtsensoren und klassischen Sensorkomponenten, um Lager während des Betriebes zu überwachen. Entsprechend ausgerüstete Lager können beispielsweise in Windkraftanlagen eingesetzt werden. Kommende Generationen von Windkraftanlagen werden Hauptlager mit fünf und mehr Meter Durchmesser haben. Um Gewicht zu sparen, werden diese Lager möglichst dünnchalig ausgelegt. Dadurch wird die gesamte Konstruktion flexibler und bei

ungünstigen Belastungssituationen, beispielsweise durch seitlich einfallende Windböen, kommt es zu Verkantungen und Verkippen einzelner Wälzkörper. Dies führt lokal zum Abreißen des Schmierfilms und zu hohen punktuellen Belastungen, die teilweise außerhalb der maximalen Belastungsgrenzen der verwendeten Werkstoffe liegen. Eine entsprechende Wälzlagerüberwachung muss also in der Lage sein, möglichst zeit- und orts aufgelöst diese Belastungen messen zu können. Dafür ist ein hoher Grad an Miniaturisierung bei gleichzeitig erhöhter mechanischer Belastbarkeit notwendig. Eine hohe chemische Belastbarkeit ist ebenso wenig gefordert wie eine hohe thermische Belastbarkeit. Die gehärteten Stähle, die für Wälzlager verwendet werden, dürfen bis maximal 120 °C im Dauerbetrieb laufen, weil sie bei Temperaturen darüber ihre Härte verlieren würden. Die Kosten für die entsprechenden Sensoren sind im Vergleich zu den herkömmlichen Sensoren hoch, weil lagerspezifische Sensoren entwickelt werden müssen und die Stückzahlen insgesamt klein sind.

Sensorische Oberflächen sind eine Variante der sensorischen Materialien [1]. Anders als herkömmliche Sensoren werden hier die Sensorstrukturen direkt auf dem zu überwachenden Bauteil hergestellt. Durch die Technologien der Mikrosystemtechnik können diese Strukturen sehr stark miniaturisiert werden und die Messungen finden sehr nah am Ursprungsort des Auftretens der physikalischen Größen statt. Durch die Einbettung in keramische Isolationsschichten lässt sich eine sehr hohe mechanische, chemische und thermische Belastbarkeit erreichen. So lassen sich beispielsweise Sensoren in Verschleißschutzschichten einbetten [2] und so vor abrasiven Einflüssen schützen. Hinzu kommt, dass bei sensorischen Oberflächen nicht nur das eigentliche Sensorelement, sondern zusätzlich Elemente für die Energie- und Datenübertragung integriert werden können. Damit ließen sich beispielsweise auf besonders schnell rotierenden Bauteilen Messungen ermöglichen, die durch anschraubbare, mit herkömmlichen Mess- und Datenübertragungssystemen aufgebaute Lösungen durch die hohen Fliehkräfte nicht möglich wären.

Sensorische Materialien stellen die Spitze der Sensorintegration dar [1, 3]. Anders als bei sensorischen Oberflächen werden hier Sensorelemente, Energiegewinnung sowie Datenverarbeitung und -übertragung in der Materialmatrix eines Bauteils eingebracht. Erste Veröffentlichungen befassen sich beispielsweise mit der Messung der Aushärtvorgänge bei der Herstellung von Kompositwerkstoffen [4]. Dazu werden zwischen die einzelnen Lagen des Faserwerkstoffes Sensoren auf Folienbasis eingelegt, die die Änderung der dielektrischen Eigenschaften des Harzes während des Aushärtens messen. Aus diesen Daten kann anschließend auf die Belastbarkeit des hergestellten Bauteils geschlossen werden. Aber auch die Einbettung von Mikrosystemen in Metalle und die Energieerzeugung durch Energy Harvesting stellt eine hohe Herausforderung dar. Ibragimov *et al.* [5, 6] stellten zu diesem Zweck Thermogeneratoren her, die in Aluminium durch Eingießen eingebettet werden können. Durch einen Temperaturunterschied zwischen den beiden Seiten des Bauteils, wie er beispielsweise bei Ölwannen vorkommt (innen heißes Motorenöl, außen kühle Umgebungsluft), kann lokal für einen Ölqualitätssensor Energie erzeugt werden, ohne dass eine Stromversorgung vom Bordnetz des Automobils bereitgestellt werden muss. Bis zur Marktreife sensorischer Materialien sind noch zahlreiche Entwicklungen notwendig.

1.1.1. Anwendungsbeispiele für sensorische Oberflächen

In diesem Abschnitt werden beispielhaft zwei Messaufgaben für Condition-Monitoring-Anwendungen aufgezeigt, die mit derzeit am Markt verfügbaren Sensoren nicht direkt gemessen werden können. Sensorische Oberflächen hingegen wären zukünftig in der Lage, diese Aufgaben zu erfüllen.

Wälzlagerüberwachung

High-End-Werkzeugspindeln rotieren mit bis zu $250\,000\text{ min}^{-1}$. Der Abriss des Schmierfilms in den Hochpräzisionslagern führt schlagartig zu einem Temperaturanstieg im Lager und damit innerhalb weniger Sekunden zu dessen Zerstörung. Anlagenstillstand, Reparatur und vor allem Produktionsausfall erreichen schnell Kosten in Millionenhöhe. Die nächste Generation von Wälzlagern wird daher die Möglichkeit der ständigen Überwachung bieten. So werden sich die Lager sowohl auf dem rotierenden als auch dem statischen Teil selbst auf kritische Betriebsparameter wie Last und Temperatur überprüfen und die Anlagensteuerung kann entsprechende Gegenmaßnahmen einleiten.

Bisher wird zur Überwachung des Verschleißzustandes von Lagern die Ölqualität oder das akkustische Emissionsspektrum analysiert [7]. Die Analyse dieser Daten hat den Nachteil, dass bereits ein – wenn auch geringer – Schaden aufgetreten sein muss, um eine Veränderung zu erkennen. Für die Detektion des Abrisses eines Schmierfilms bei sehr hohen Umdrehungsgeschwindigkeiten sind diese Sensoren zu langsam. Daher sollen in Zukunft Dünnschicht-Sensorelemente direkt auf der Lauffläche zum Einsatz kommen. Eine Arbeitsgruppe des Fraunhofer IST beschäftigt sich intensiv mit Dünnschichtsensoren auf der Basis von diamantartigen Kohlenwasserstoffschichten (DLC-Schichten) [8, 9, 10]. Mit diesen Schichten ausgestattete Lager sind in der Lage, direkt die auftretenden Kräfte orts aufgelöst zu messen. Nachteil der DLC-Schichten ist, dass die Änderung ihres elektrischen Widerstandes stark temperaturabhängig ist. Diese Abhängigkeit lässt sich durch eine zusätzliche Dotierung mit Nickelatomen stark reduzieren [11]. Mihara und Someya [12] haben die Lagerstelle einer Pleuelstange mit einem Dünnschichtsensor aus einer Cu-Mn-Ni-Legierung versehen und waren damit in der Lage, den Druck und den Abriss des Ölfilms zu messen. Ein nennenswerter Temperatureinfluss auf das Sensorsignal bestand durch die gewählte Legierung des Sensormaterials nicht. Brecher *et al.* [13] haben ein Sensorsystem zur Temperaturüberwachung von Lagern bis zu $30\,000\text{ min}^{-1}$ entwickelt. Dieses System beinhaltet neben der eigentlichen Sensortechnik auch Elemente zur Energiegewinnung und Datenübertragung, ist dafür aber aus Standardkomponenten und nicht in Dünnschichttechnik hergestellt.

Umformwerkzeuge

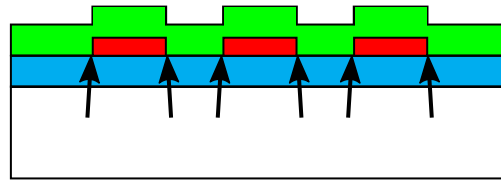
In der Warm- und Kaltumformung tätige Hersteller sind daran interessiert, Parameter wie Druck, Temperatur und Blecheinzug im Werkzeug lokal aufgelöst zu messen. Qualitätssichernde Maßnahmen werden auf diese Weise von der bisher nachgelagerten Prüfung direkt in den Herstellungsprozess integriert. So ist es beispielsweise möglich, durch den Blecheinzug auf Einschnürungen im hergestellten Bauteil zu schließen. Durch eine entsprechend

angepasste Prozessführung lässt sich so die Produktqualität entscheidend verbessern und Ausschuss vermindern.

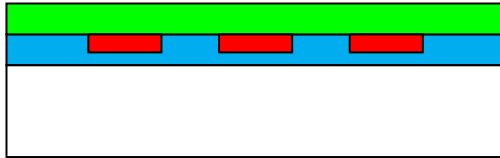
Spur *et al.* [14] nutzen einen kontaktlosen Wirbelstromsensor, der in der Lage war, den Blecheinzug und die Kraft des Niederhalters zu regeln. Einen anderen Weg geht eine patentierte Lösung von Liewald *et al.* [15]. Hier wird der Blecheinzug über die Bewegung eines Adapters gemessen, der während des Prozesses mittels Federkraft oder pneumatisch gegen das eingezogene Blech gedrückt wird. Damit sitzt die eigentliche Messtechnik außerhalb der für Sensoren mechanisch und thermisch anspruchsvollen Zone. Dies wird ebenfalls über die Nutzung von Lasertriangulation erreicht [16]. Der Messbereich ist jedoch durch das Messprinzip des Sensors stark eingeschränkt, sodass sehr große Blecheinzüge über 200 mm damit nicht detektiert werden können. Zudem ist das System nicht geeignet, um innerhalb von dreidimensional geformten Niederhaltern zu messen. Die Autoren schlagen ebenfalls die Nutzung eines auf Wirbelströmen basierenden Systems vor. Zudem halten sie die Nutzung von zahlreichen piezoresistiven Dünnschichtsensoren, die lokal aufgelöst die Kraft und damit die Position des Bleches in Relation zum Niederhalter messen, für möglich. Dieses Konzept wurde von Biehl *et al.* [17] umgesetzt. Eine Schicht aus diamantartigem Kohlenwasserstoff wurde auf Einsätzen aufgebracht und mit Elektroden versehen, die in das Umformwerkzeug eingesetzt werden. Damit ist der eigentliche Sensor in direktem Kontakt mit dem Werkstück. Die Autoren konnten zeigen, wie sich die eingezogene Blechkante während des Umformprozesses im Werkzeug bewegt. Ein Problem besteht bei der Nutzung von DLC-Schichten bei Temperaturen über 300 °C, weil sie darüber instabil werden und verbrennen [18, 19]. Während der Warmumformung, wie beispielsweise beim Schmieden, herrschen jedoch Temperaturen bis zu 1300 °C mit einer Temperaturdifferenz von 1000 K zwischen Werkstück und Werkzeug. Es gibt erste Ansätze zur Überwachung der Formfüllung beim Schmieden [20, 21]. Dazu wird an beiden Seiten des Schmiedewerkzeugs eine elektrische Spannung angelegt und ihre Änderungen während des Schmiedevorgangs analysiert. Damit lässt sich bereits zwischen Gut- und Schlechtteil unterscheiden. Es sind jedoch noch zahlreiche Weiterentwicklungen auf dem Gebiet notwendig, weil die bisherige Lösung nur wenige Schmiedezyklen besteht, bevor sie zerstört wird.

1.2. Sensoreinbettung

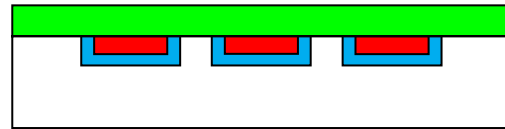
Weil zahlreiche der im vorherigen Kapitel hergestellten Sensoren mit den Technologien der Mikrosystemtechnik hergestellt wurden, ähneln sie diesen Mikrosystemen auch im Aufbau. Ein typischer Aufbau ist in Abbildung 1.2a dargestellt. Zunächst wird das Bauteil (weiß) mit einer ersten Isolationsschicht (blau) versehen, welche die Aufgabe hat, die folgende sensorische Schicht (rot) elektrisch von einem metallischen Bauteil zu isolieren. Diese Isolationsschicht kann bei elektrisch nicht leitfähigen Bauteilen entfallen. Durch die Strukturierung der sensorischen Schicht wird eine Oberflächentopographie erzeugt. Diese ist typischerweise zwischen einigen hundert Nanometern und einigen wenigen Mikrometern dick. Abschließend wird eine zweite Isolationsschicht (grün) abgeschieden, die die Sensorschicht elektrisch nach außen isoliert und vor weiteren Umwelteinflüssen schützt. Diese Schicht wird konform über der Sensorschicht abgeschieden, sodass sich



(a) Klassischer Aufbau einer Sensorstruktur. Die Pfeile kennzeichnen Bereiche, die durch Lastwechsel im mechanischen Kontakt mit anderen Bauteilen besonders gefährdet sind.



(b) Sensorstruktur in Isolationsschicht eingebettet.



(c) Sensorstruktur in Bauteiloberfläche eingebettet.

Abbildung 1.2. Einbettungsvarianten für Sensorelemente. Das zu überwachende Bauteil ist weiß dargestellt, die erste Isolationsschicht blau und die zweite Isolationsschicht ist grün. Die Sensorstruktur ist rot dargestellt.

die Sensortopographie hier fortsetzt. Bei klassischen Mikrosystemen, welche anschließend in einem Gehäuse verkapselt werden, schadet diese Oberflächentopographie nicht. Soll der Sensor aber beispielsweise unter Rollkontaktbeanspruchung in einem Wälzlager eingesetzt werden, wirken sich die ständigen, durch die Topographie hervorgerufenen Lastwechsel negativ auf die Haltbarkeit des Sensors und des darunterliegenden Bauteils aus. Aus Gesprächen mit Autoren wissenschaftlicher Veröffentlichungen zum Thema Wälzlagersensorik und mit Mitarbeitern von auf diesem Gebiet aktiven Unternehmen ist bekannt, dass bisher kein oberflächenintegrierter Sensor existiert, der über die gesamte Lebensdauer des zu überwachenden Lagers die Wälzkontaktbeanspruchung überstehen kann.

Um die mechanische Beständigkeit zu erhöhen, ist es sinnvoll, den Herstellungsprozess so zu führen, dass die Oberfläche plan bleibt (siehe Abbildungen 1.2b und 1.2c). Wenn durch eine entsprechende Materialauswahl erreicht wird, dass alle verwendeten Materialien ähnliche Eigenschaften aufweisen, was Härte, Elastizitätsmodul und thermische Ausdehnung betrifft, ist zu erwarten, dass die Lebensdauer der Sensoren signifikant erhöht werden kann.

Abbildung 1.2b zeigt, wie die Sensorstruktur in die schützende Isolationsschicht eingebettet wird. Dazu wird die erste Isolationsschicht entsprechend der Sensorstruktur geätzt und anschließend die Sensorschicht in dieser Struktur abgeschieden. Die Oberfläche ist vollständig plan und bleibt dies auch nach Abscheidung der schützenden zweiten Isolationsschicht. Die Herstellung und Charakterisierung eines solchen Sensors wird im folgenden Abschnitt beschrieben.

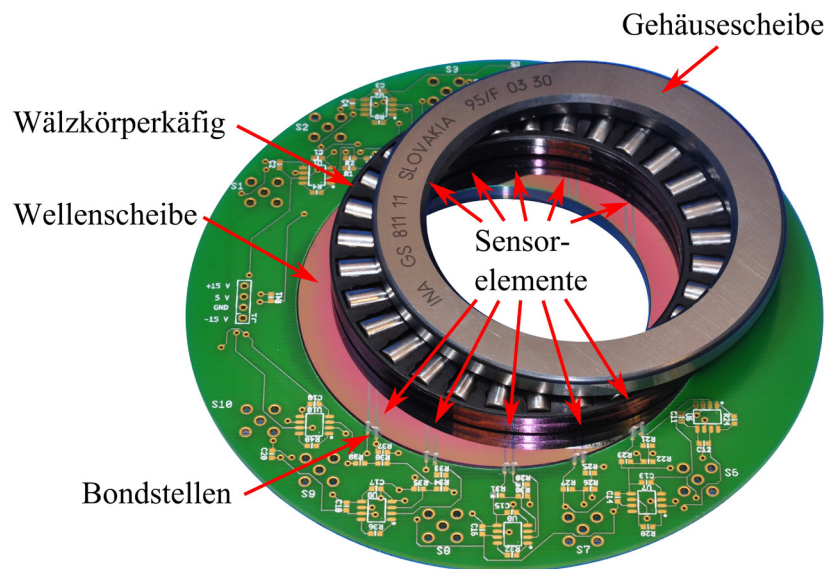


Abbildung 1.3. Mit sensorischer Oberfläche ausgestattetes Axial-Zylinderrollenlager.

Abbildung 1.2c stellt eine in die Oberfläche des zu überwachenden Bauteils eingebettete Sensorstruktur dar. Dazu wird zunächst die Oberfläche strukturiert und anschließend isoliert. Die sensorische Schicht wird abgeschieden und füllt die hergestellten Gruben aus. Die nicht benötigten Bereiche werden abgeschliffen, sodass die Oberfläche planarisiert wird. Die zweite Isolationsschicht schützt den Sensor. Abschnitt 1.2.2 stellt die technologischen Schritte für diese Art der Einbettung näher dar.

1.2.1. Einbettung in die Isolationsschicht

Zur Demonstration des Prozesses der Einbettung der Sensorstruktur in die Isolationsschicht wird die Wellenscheibe eines Axial-Wälzlagers vom Typ 81111-TV auf der Lauffläche mit Dehnungsmessstreifen ausgestattet (Abbildung 1.3). Die Wellenscheibe hat einen Innendurchmesser von 55 mm, einen Außendurchmesser von 78 mm und ist 5 mm hoch. Die Sensorstruktur besteht aus einer Leiterbahn mit 450 μm Breite, die den eigentlichen mäanderförmigen Sensor kontaktiert. Im sensitiven Bereich ist die Leiterbahnbreite auf 15 μm Breite reduziert. Verschiedene Sensordesigns, die um 22,5° und 45° zu Rotationsachse der Wälzkörper gedreht sind, wurden erstellt.

Die Herstellung der sensorischen Oberfläche beginnt mit der Vorbereitung der Lauffläche. Nach einer Entfettung wird sie mechanisch poliert, sodass die Rauheit von $R_a = 500 \text{ nm}$ im Lieferzustand auf $R_a < 20 \text{ nm}$ reduziert wird (Abbildung 1.4a). Zum Polieren wird ein poröses Neoprentuch mit einer kolloidalen SiO_2 -Suspension verwendet (Partikelgröße 0,04 μm). Nach einer erneuten Reinigung wird die erste, 500 nm dicke Isolationsschicht aus Al_2O_3 mittels Hochfrequenzsputtern abgeschieden (Abbildung 1.4b). Anschließend wird die komplette Wellenscheibe mittels Sprühbelackung beschichtet. Auf der Lauffläche

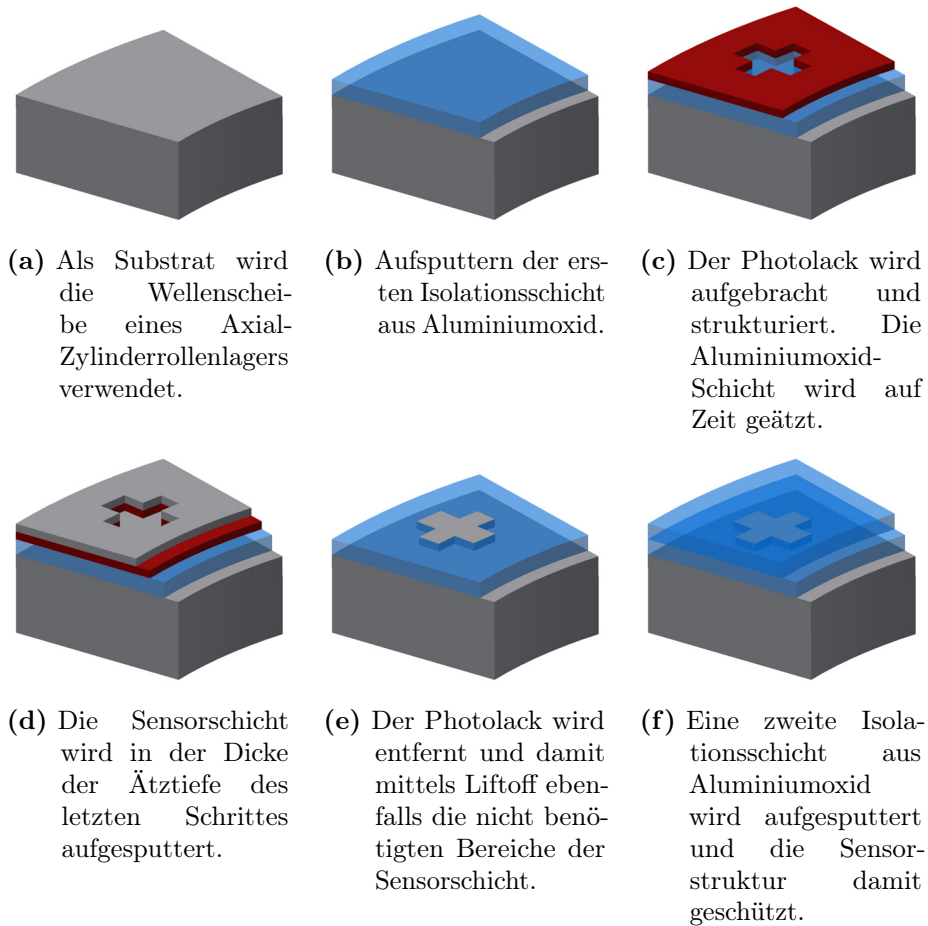
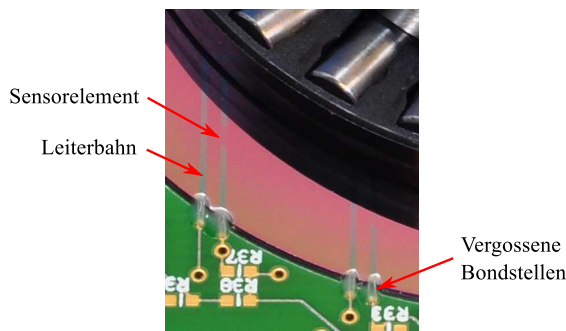
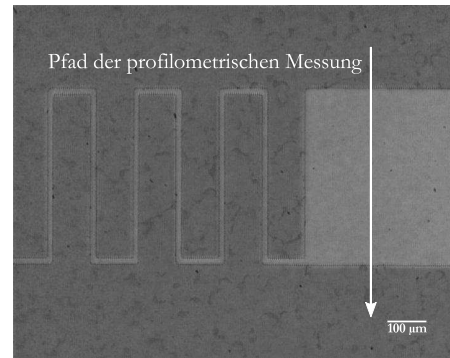


Abbildung 1.4. Ablauf der einzelnen Arbeitsschritte zur Herstellung eines sensorischen Lagers mit in der Verschleißschutzschicht eingebetteten Sensorstrukturen. Die Darstellungen sind nicht maßstabsgerecht.



(a) Detailaufnahme der Lauflfläche mit den Sensorelementen und den Bondstellen.



(b) Mikroskopische Aufnahme des Dehnungsmessstreifens. Die Leiterbahnbreite verjüngt sich von 450 µm auf 15 µm Breite im Bereich des Mäanders. Die profilometrische Messung entlang des eingezeichneten Pfades ist in Abbildung 1.6 dargestellt.

Abbildung 1.5. Detailaufnahmen der Sensorstrukturen auf einem sensorischen Lager.

beträgt die Schichtdicke des Lacks 10 µm. Die zur Strukturierung notwendigen Schritte (Belichtung und Entwicklung) werden durchgeführt und das Lager anschließend getempert, um eine hohe Stabilität des Lacks zu erreichen. Nach einer Sauerstoffplasma-Behandlung zur Verbesserung der Benetzung durch das Ätzmedium wird die Al_2O_3 -Schicht 100 nm tief auf Zeit geätzt (Abbildung 1.4c). Dies geschieht in 85 %iger Phosphorsäure bei 55 °C Badtemperatur. Die Ätzrate beträgt etwa 0,63 nm/s. Zu diesem Zeitpunkt wird der Photoresist noch nicht entfernt, sondern noch einmal als Liftoff-Maske verwendet. Eine 100 nm dicke Titan-Schicht, die die zuvor geätzte Struktur auffüllt, wird auf das Lager gesputtert (Abbildung 1.4d). Nun erst wird der Photoresist mit Aceton entfernt und damit die Sensorstruktur freigelegt (Abbildung 1.4e). Die Kanten der Metallisierung stimmen durch diese spezielle Prozessführung genau mit denen der geätzten Struktur überein. Zum Schutz der noch offenliegenden Sensorstruktur wird eine weitere, 500 nm dicke Al_2O_3 -Schicht aufgesputtert (Abbildung 1.4f). Der vollständige Prozessablauf befindet sich im Anhang ab Seite 138. Die Kontaktstellen zwischen den Leiterbahnen auf dem Lager und den korrespondierenden Anschluss pads auf der Platine werden mittels Drahtbonden hergestellt. Dazu wird an den Bondstellen zunächst mittels Ultraschall lokal die Al_2O_3 -Schicht entfernt, anschließend wird gebondet und die Bondstellen werden mit einem Epoxidharz vergossen.

Abbildung 1.5 zeigt Detailaufnahmen sowohl der Bondstellen, als auch eines hergestellten Sensors. Insgesamt befinden sich zehn Dehnungsmessstreifen auf dem Lagerring.

Die profilometrische Messung entlang des in Abbildung 1.5b eingezeichneten Pfades ist in Abbildung 1.6 dargestellt. Die Messung wurde vor dem Abscheiden der zweiten

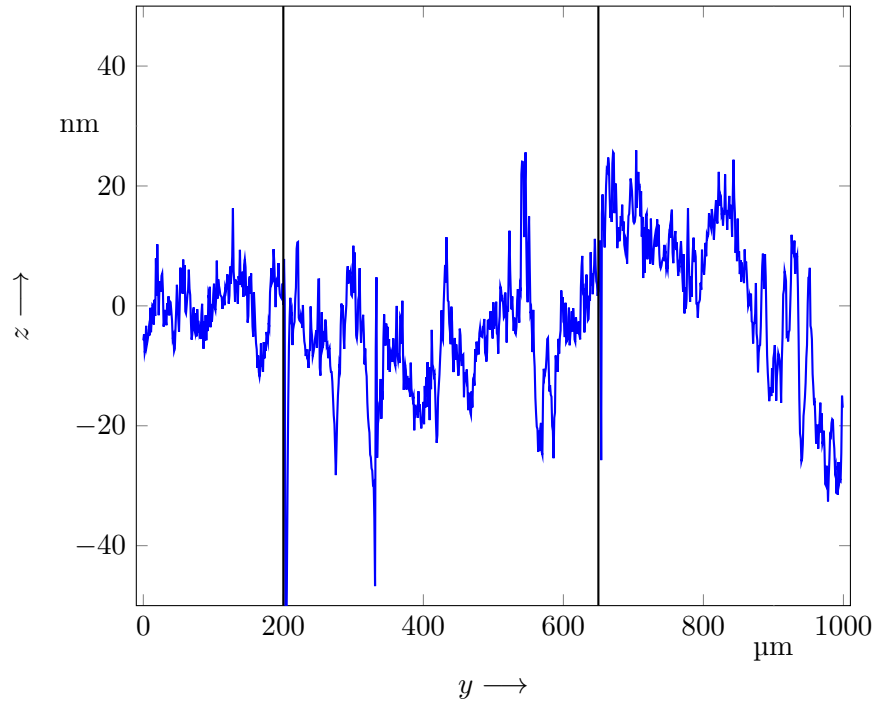


Abbildung 1.6. Profilometrische Messung entlang des in Abbildung 1.5b eingezeichneten Pfades. Die Leiterbahn befindet sich zwischen den beiden senkrechten Linien und ist $450\text{ }\mu\text{m}$ breit. Sie liegt innerhalb der Oberflächenrauheit ($R_a = 9,1\text{ nm}$).

Al_2O_3 -Schicht (zwischen den Schritten (e) und (f) in Abbildung 1.4) durchgeführt. Die in der Isolationsschicht liegende Leiterbahn befindet sich zwischen den beiden senkrechten Linien. Es wird deutlich, dass sich diese Struktur in die Oberflächenrauheit der umgebenden Fläche einfügt und weder hervorsteht noch nach unten versetzt ist. Weil der Photolack zwischen der Ätzung und der Abscheidung der Sensorschicht nicht entfernt wurde, entstehen auch keine Probleme durch eine nicht optimale Ausrichtung des Grabens und des darin befindlichen Sensors. Diese wären als Lücken oder Aufwürfe an den Kanten der Leiterbahnline in der profilometrischen Messung erkennbar. Der große Vorteil dieser Herstellungsmethode ist die einfache Übertragbarkeit auf gekrümmte Oberflächen. Mittels einer flexiblen Folienmaske lässt sich auch eine zylindrische Oberfläche photolithographisch strukturieren. Die doppelte Nutzung der Lackschicht macht eine Ausrichtung zweier Maskenebenen zueinander obsolet und spart zudem einen zusätzlichen Arbeitsschritt.

Die Charakterisierung des hergestellten Sensors befindet sich im Anhang ab Seite 103.

1.2.2. Einbettung in die Oberfläche

Neben der Einbettung in die Isolationsschicht lassen sich Sensoren direkt in die Oberfläche des zu überwachenden Bauteils einbetten (vgl. Abbildung 1.2c auf Seite 6). Dazu wird zunächst die Oberfläche entsprechend der Sensorgeometrie strukturiert (Abbildung 1.7b). Im Gegensatz zu allen bekannten Verfahren, bei denen meist eine dünne metallische

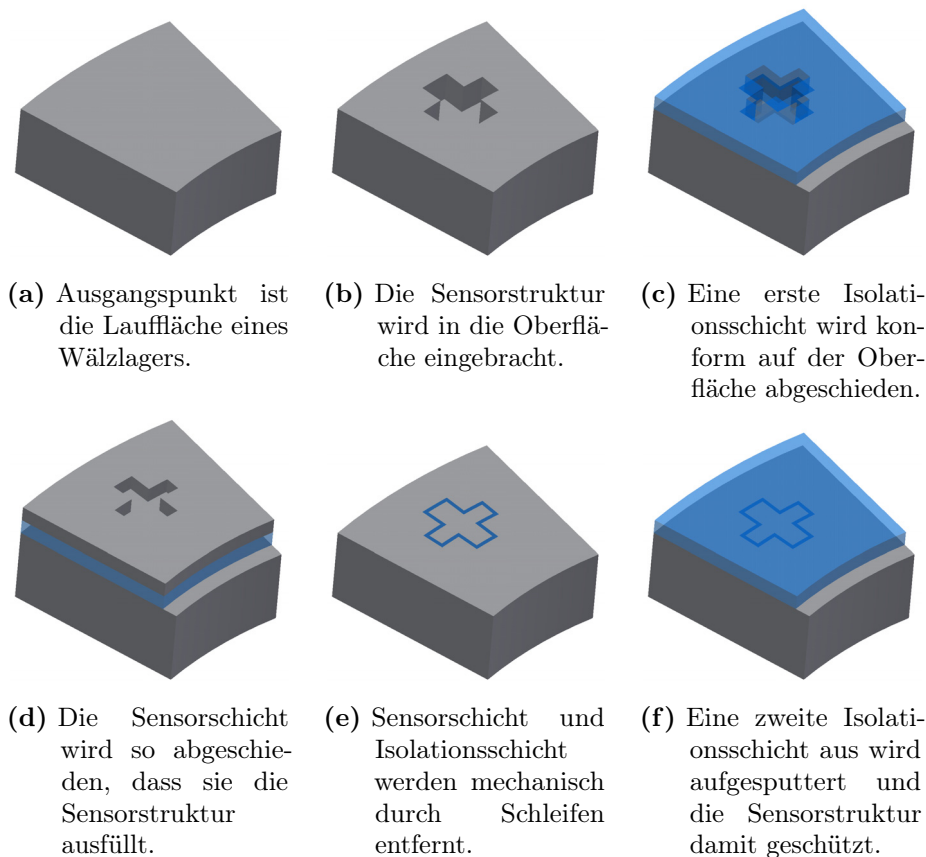


Abbildung 1.7. Ablauf der einzelnen Arbeitsschritte zur Herstellung eines sensorischen Lagers mit in die Oberfläche eingebetteten Sensorstrukturen. Die Darstellungen sind nicht maßstabsgerecht.

Schicht strukturiert wird, bedeutet die Herstellung der Sensorstruktur hier die Herstellung einer Grube in Sensorform. Anschließend wird eine Isolationsschicht konform auf dieser Oberflächentopographie abgeschieden (Abbildung 1.7c). Sie dient dazu, das Sensormaterial von dem elektrisch leitfähigen Substratmaterial zu isolieren. Auf diese Schicht wird das Material des Sensors abgeschieden, sodass es die zuvor hergestellten Strukturen komplett auffüllt (Abbildung 1.7d). Ist es bei der Einbettung in die Isolationsschicht noch notwendig, diese Füllung exakt so hoch abzuschneiden wie die hergestellte Struktur, kann sie in diesem Fall etwas höher ausfallen. Der nächste Schritt ist ein Schleifprozess, bei dem das aufgetragene Material wieder teilweise abgenommen wird (Abbildung 1.7e). Durch das Abschleifen dieser Schichten wird die Sensorstruktur herausgearbeitet. Der letzte Schritt besteht im Aufbringen einer weiteren elektrisch isolierenden Schicht und gegebenenfalls einer tribologischen Verschleißschicht zum Schutz der Sensorelemente (Abbildung 1.7f).

Der Vorteil dieses Verfahrens liegt darin, dass die meisten Prozesse im Falle der Herstellung von Wälzlagern bereits verfügbar sind. Sowohl der Schleifprozess als auch die Beschichtungsprozesse sind bei den Herstellern im Fertigungsprozess zugegen. So werden Lagerringe vor dem Härten auf Maß geschliffen oder nachträglich, im Falle stromisolierender Lager, mit keramischen Schichten versehen. Lediglich ein wirtschaftlicher Prozess zur Herstellung der Sensorstrukturen in großen Stückzahlen ist bisher nicht vorhanden.

1.3. Fertigungsverfahren

Um Sensorstrukturen in großen Stückzahlen in die Oberfläche von Bauteilen einbringen zu können, ist ein geeignetes Fertigungsverfahren notwendig. An dieses werden folgende Anforderungen gestellt:

- Bearbeitung (gehärteter) Stähle und anderer Metalle
- Bearbeitung gekrümmter Oberflächen
- Dreidimensionale Strukturen herstellbar
- Kurze Prozesszeiten

Zahlreiche zu überwachende Bauteile bestehen aus Metallen, meist aus Stahl. Als Beispiele seien Lager oder Umformwerkzeuge genannt. Diese werden aus Verschleißschutzgründen oftmals gehärtet oder mit einer Verschleißschicht versehen. Diese Bauteile sind nur in wenigen Fällen planar. Je nach Anordnung und Typ weisen Lager zylindrische oder sphärische Oberflächen auf. Bei Umformwerkzeugen sind die Blechniederhalter teilweise dreidimensional geformt, sodass auch hier keine planaren Flächen vorhanden sind. Das in Abschnitt 1.2.1 beschriebene sensorische Lager stellt daher einen Ausnahmefall dar. Eine weitere Forderung besteht darin, dass auch dreidimensionale Strukturen hergestellt werden sollen. Dies bedeutet, dass von der Werkstückoberfläche über die strukturierte Fläche nicht nur eine gleichbleibend tiefe Struktur erstellt werden können soll (2-D Struktur), sondern Bereiche unterschiedlicher Tiefe realisiert werden können (2,5-D Struktur). Echte 3-D Strukturen mit Hinterschneidungen werden nicht gefordert. Die abschließende Forderung besteht darin, dass die Prozesszeiten möglichst kurz ausfallen sollen. Während Umformwerkzeuge in kleinen Stückzahlen hergestellt werden, werden pro Jahr und Hersteller einige hunderttausend Lager hergestellt. Bei einer Stückzahl von 200 000 Stück pro Jahr auf einer Anlage bedeutet dies bei 8760 Stunden pro Jahr (Stillstandszeiten werden außer Acht gelassen), dass pro Bauteil weniger als 2 Minuten und 40 Sekunden an Prozesszeit für die Herstellung zur Verfügung stehen.

DIN 8580 gliedert Fertigungsverfahren in verschiedene Kategorien (Abbildung 1.8). Für die Herstellung der Strukturen wird ein abtragendes Fertigungsverfahren benötigt. Diese werden in DIN 8590 in thermisches, chemisches und elektrochemisches Abtragen untergliedert.

1. Einleitung

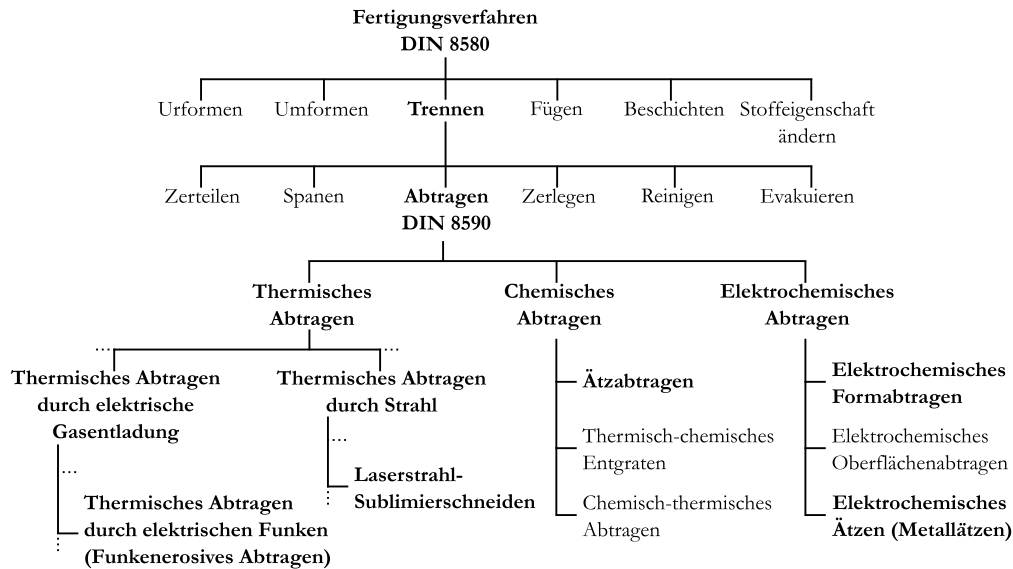


Abbildung 1.8. Fertigungsverfahren nach DIN 8580 und DIN 8590. Im Bereich des thermischen Abtrags wurden aus Gründen der Übersicht nur die für die Mikrostrukturierung relevanten Verfahren aufgenommen.

1.3.1. Thermisches Abtragen

Im Bereich des thermischen Abtrags kommen zwei Verfahren, das funkenerosive Abtragen und das Laserstrahl-Sublimierschneiden, in Frage. Sie sind geeignet, Mikrostrukturen herzustellen und haben zudem einen niedrigen thermischen Eintrag in die Oberfläche. Thermische Verfahren sind insofern schwierig, als dass gehärtete Stähle bei einem zu hohen Temperatureintrag ihre Härte verlieren. Ein typischer Wälzlagerstahl der Sorte 100Cr6 wird bei 150 °C bis 180 °C nach dem Härten angelassen, um Spannungen abzubauen. Der Stahl verliert dadurch an Härte und wird zäher. Ein weiterer lokaler Temperatureintrag beinhaltet immer die Gefahr, dass weitere Spannungen in das Material eingebracht werden. Diese sind bei mechanisch hoch belasteten Bauteilen unerwünscht, weil sie im Betrieb Schäden verursachen können. Beim Funkenerodieren und Laserstrahl-Sublimieren (auch Laserablation genannt), kann dieser Temperatureintrag auf ein erträgliches Maß reduziert werden.

1.3.1.1. Funkenerosives Abtragen

Funkenerosives Abtragen (engl. *Electro-Discharge-Machining, EDM*) ist eines der ältesten nichttraditionellen Fertigungsverfahren. Dabei wird in einem schmalen Spalt (einige zehn Mikrometer) zwischen Werkstück und der Werkzeugelektrode, in dem sich ein flüssiges Dielektrikum befindet, ein Funke gezündet (Abbildung 1.9a). Dies geschieht durch eine gepulste Spannung, die so groß sein muss, dass die Durchschlagsfestigkeit des Dielektrikums überschritten wird. Sowohl Werkstück als auch Elektrode müssen elektrisch leitfähig sein. Als Dielektrikum wird meist Öl oder deionisiertes Wasser verwendet. Es dient zudem

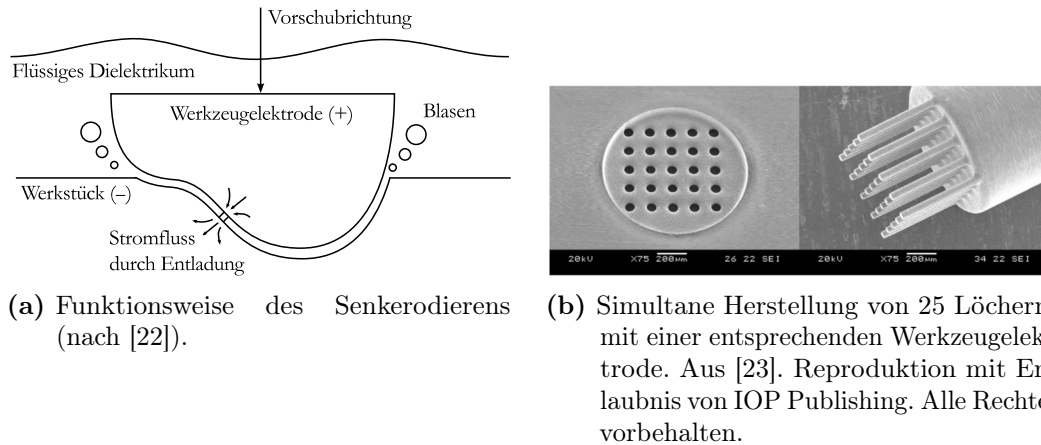


Abbildung 1.9. Funktionsweise und Ergebnis des funkenerosiven Abtragsens.

dazu, abgetragenes Material sowie durch Elektrolyse entstehende Gasblasen zu entfernen. Bei jeder Funkenentladung wird nur lokal an einer Stelle Material abgetragen. Daher wird in der Praxis die elektrische Spannung mit 1 kHz bis 1 MHz gepulst, um die Abtragsrate zu erhöhen.

Das Verfahren wird bei Materialien angewendet, die sowohl elektrisch leitfähig als auch schwierig mit konventionellen Fertigungsverfahren bearbeitbar sind. Dies ist beispielsweise bei gehärteten Stählen oder elektrisch leitfähigen Keramiken der Fall. Aber auch Wolfram als schwierig zu bearbeitendes Material ist prädestiniert für den Einsatz von funkenerodierendem Abtragen. Bei den Typen der Werkzeugelektroden wird zwischen Drahtelektroden und Senkelektroden unterschieden. Beim Drahterodieren wird ein dünner Draht als Elektrode verwendet. Dieser wird zwischen zwei Spulen der Länge nach an dem Werkstück vorbeigeführt, sodass der aktive Bereich sich auf der Drahtseite ständig ändert und damit sein Verschleiß minimiert wird. Beim Senkerodieren wird die Elektrode als Negativabbild der herzustellenden Form erstellt und in das Werkstück gesenkt (Abbildung 1.9a). Dadurch lassen sich auch spitze Ecken mit sehr geringem Radius realisieren, was beim konventionellen Fräsen nicht möglich ist.

Im Bereich des Mikro-Funkenerodierens (Mikro-*EDM*) wurden in den vergangenen Jahren zahlreiche Fortschritte gemacht. Dies betrifft insbesondere die Herstellung sehr kleiner Werkzeugelektroden. Masazuwa *et al.* [24] stellten erstmals miniaturisierte Werkzeugelektroden her. Dazu wird ein Draht mittels *EDM* so weit abgedünnt, dass nur noch ein kleiner Rest übrig bleibt. Damit konnten Löcher mit 10 µm Durchmesser hergestellt werden. Die Autoren lösten zahlreiche damit verbundene Probleme [25]. Die Herstellung der Elektroden wurde stark verfeinert, was die Geschwindigkeit und die Präzision betrifft. Kim *et al.* [23] haben Elektroden mit mehreren Spitzen hergestellt, sodass mehrere Löcher gleichzeitig hergestellt werden können (Abbildung 1.9b). Teilweise sind diese an der Spitze tellerförmig ausgeführt, sodass in gewissem Maße auch Hinterschneidungen möglich sind.

Funkenerodieren ist ein sehr langsames Verfahren. Die Prozesszeiten liegen im Minu-

tenbereich. Dies liegt einerseits daran, dass pro Puls lediglich an der Stelle des Funkens Material abgetragen wird, andererseits verschleifen die Werkzeugelektroden und müssen regelmäßig ersetzt werden. Unter dem Verschleiß leidet auch die Präzision, was teilweise durch eine intelligente Regelung berücksichtigt wird. Takahata *et al.* und Masaki *et al.* haben daher Werkzeugelektrodenarrays mit bis zu 400 Elektroden mittels LiGA (*Lithographie, Galvanik und Abformung*) hergestellt und damit Stahl 50 μm tief strukturiert [26, 27]. Die Elektroden hatten einen Durchmesser von 20 μm und eine Höhe von 300 μm . Die dafür benötigte Zeit betrug etwa fünf Minuten, was 600 mal schneller als die Herstellung mit lediglich einer Elektrode ist. Die Prozesszeit sinkt nicht proportional zur Anzahl der verwendeten Werkzeugelektroden, weil die Geschwindigkeit des Vorschubs von der Größe der Oberfläche des Werkzeugs abhängt [28, 29]. Durch eine größere Fläche lädt sich die Doppelschicht zwischen Elektrode und Elektrolyt langsamer auf, sodass für größere Flächen eine längere Pulszeit und eine größere Pulsamplitude notwendig ist. Es wurden zahlreiche Methoden zur schnellen Herstellung von miniaturisierten Werkzeugelektroden entwickelt (u.a. [30, 31, 32]); das grundsätzliche Problem der langen Prozesszeiten besteht jedoch weiterhin.

1.3.1.2. Laserstrahl-Sublimierschneiden

Beim Laserstrahl-Sublimierschneiden, auch Laserablation genannt, wird das Material durch einen hochenergetischen Laserstrahl entfernt. Ein durchgängiger Strahl oder ein Strahl mit langen Pulsen (Nanosekunden) bewirkt zunächst ein Aufschmelzen des Materials und anschließend dessen Verdampfung (Abbildung 1.10a links und Mitte) [35]. Das Material dehnt sich schlagartig aus und schießt vom Werkstück weg. Dadurch bildet sich im Material eine Schockwelle aus, die Änderungen in der Struktur des Materials hervorruft [36].

Durch die Verkürzung der Pulse in den Pico- oder Femtosekundenbereich bei gleichzeitig sehr hohen Intensitäten wird bei metallischen Werkstoffen die Energie zunächst von den freien Elektronen absorbiert. Innerhalb weniger Picosekunden werden die Atomkerne zu thermischen Schwingungen angeregt [35]. Die hohe Energie der Elektronen führt zum Aufbrechen chemischer Verbindungen [37, 38]. Dies hat zur Folge, dass die Bildung eines Plasmas bei Pico- oder Femtosekundenpulsen der vorherrschende Modus ist [39]. Zudem kommt es nicht zu einer so starken Schockwelle wie unter der Verwendung von Nanosekundenpulsen.

Laserablation wird häufig zu Herstellung von Löchern verwendet [40, 37, 39, 36, 41]. Die qualitativ besten Ergebnisse lassen sich mit Femtosekundenpulsen erreichen [42]. Shaheen *et al.* haben Proben aus Eisen bearbeitet [41]. Dabei kam es zu einer vergleichsweise starken Kraterbildung; abgetragenes Material schlug sich neben dem hergestellten Loch nieder. Diese Kraterbildung kann minimiert werden, wenn die Strukturierung im Vakuum statt in Luft vorgenommen werden [40], was das Verfahren allerdings aufwändiger macht.

Eine große Rolle spielt die Laserablation bei der Massenspektroskopie. In der Massenspektroskopie mit induktiv gekoppeltem Plasma (engl. *coupled plasma mass spectroscopy*, *ICP-MS*) wird eine Probe durch ionisiertes Argon auf bis zu 10 000 $^{\circ}\text{C}$ erhitzt und so ein Plasma erzeugt, welches anschließend analysiert wird. Durch Laserablation lässt sich

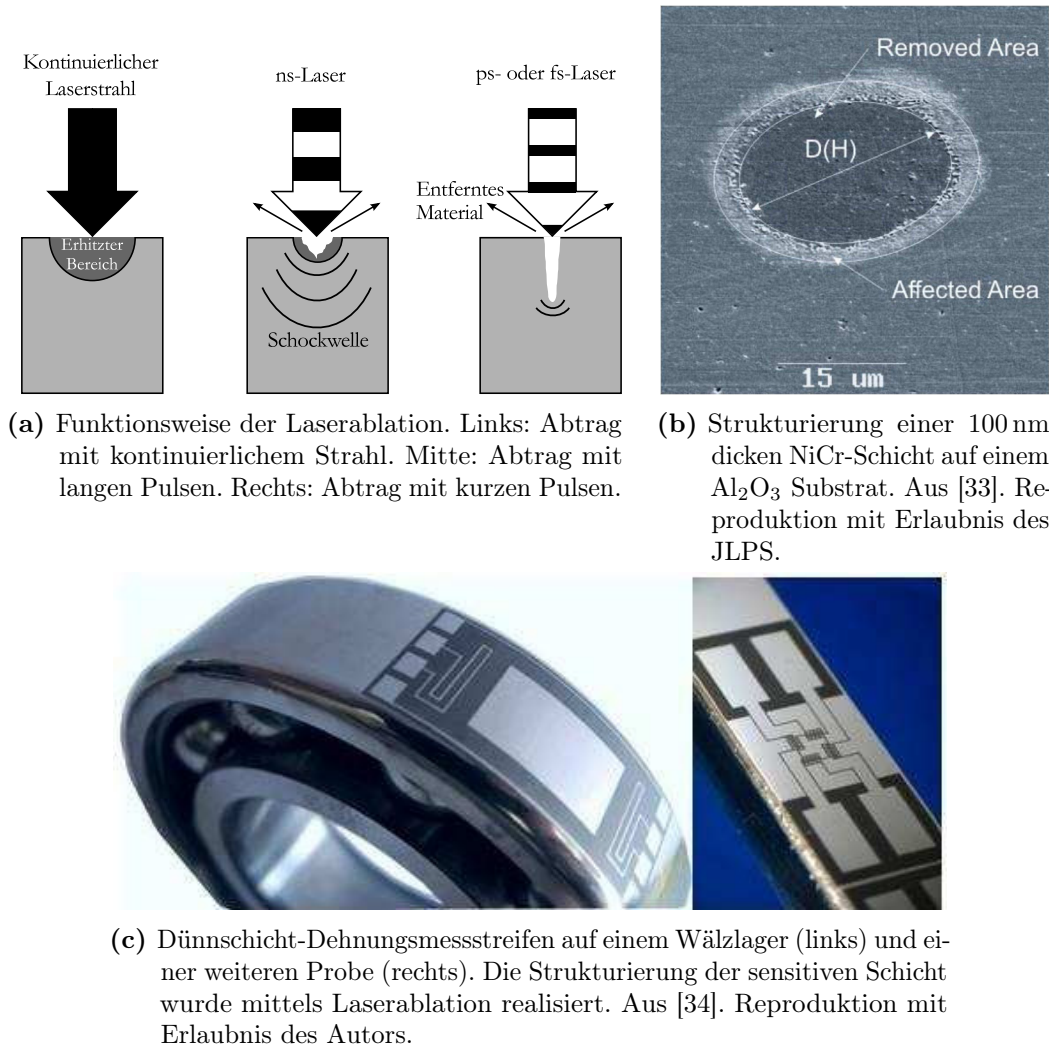


Abbildung 1.10. Funktionsweise und Ergebnisse der Laserablation.

dieses Plasma sehr lokal erzeugen, sodass sehr präzise Messungen ermöglicht werden und dabei die Schädigung des zu untersuchenden Gegenstandes minimal ausfällt [43].

Die Strukturierung von Dünnschichten wurde mit verschiedenen Metallen und Pulsdauern untersucht [44, 45, 46, 47, 48]. Das *Laser Zentrum Hannover* hat erstmals gesputterte NiCr-Sensorschichten mittels Laserablation mit dem Ziel strukturiert, eine kostengünstige und schnelle Alternative zu herkömmlichen Lithographie- und Ätzprozessen bereitzustellen [49]. Damit fertigten sie erfolgreich Dehnungsmessstreifen auf Wälzlagern [33] oder auf einfachen Proben [50] (Abbildung 1.10c). Der Schichtaufbau bestand dabei aus dem Substrat (bspw. dem Lager), einer 3 μm dicken Al_2O_3 -Schicht und der 200 nm dicken NiCr-Schicht. Die Autoren untersuchten ebenso den Einfluss der Ablation auf die Isolationsschicht [51]. Durch die unterschiedlichen Materialien lassen sich die Prozessparameter so wählen, dass die Isolationsschicht unbeschädigt bleibt.

Abbildung 1.10b zeigt das Ergebnis der Strukturierung einer 100 nm dicken NiCr-Schicht auf Al_2O_3 . Es ist deutlich zu sehen, dass im inneren Bereich des Kreises die NiCr-Schicht vollständig entfernt wurde. Um diesen Kreis herum befindet sich jedoch ein Bereich, in dem die Energie der Laserstrahlung nicht ausreichte, das Material zu entfernen. Sie war jedoch so groß, dass die Schicht beeinflusst, also geschmolzen wurde, ohne zu verdampfen.

Die Strukturierungszeit für einen etwa 600 μm mal 600 μm großen Dehnungsmessstreifen liegt bei etwa 15 Sekunden [50].

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Laserablation ein sehr interessantes Verfahren darstellt, um die geforderten Kriterien zu erfüllen. Bisher wurden Dehnungsmessstreifen auf gekrümmten Oberflächen hergestellt, die wie zahlreiche andere veröffentlichte Sensoren eine Oberflächentopographie aufweisen. Die Strukturierung von Oberflächen zum Einbringen von Sensoren, wie sie in Abschnitt 1.2.2 beschrieben wird, wurde bisher nicht durchgeführt. Außerdem müsste der Einfluss des geringfügigen Temperatureintrags auf gehärtete Stähle untersucht werden. Das Verfahren ist relativ teuer, weil sowohl ein Laser als auch eine dreidimensionale Kinematik zur Positionierung des Werkstückes im Brennpunkt des Laserstrahls benötigt wird.

1.3.2. Chemisches Abtragen

Unter chemischem Ätzabtragen wird das Abtragen von Material durch die direkte chemische Reaktion mit einem flüssigen Wirkmedium verstanden, wobei das bearbeitete Material nicht elektrisch leitfähig ist. Als Wirkmedium werden Säuren oder Laugen eingesetzt. Das Verfahren kommt demnach nicht bei Metallen zum Einsatz, denn dort wird elektrochemisch, d.h. ohne äußere Stromquelle unter Bildung von Lokalelementen am Werkstück, geätzt.

Werden hingegen elektrisch nicht leitfähige Materialien bearbeitet (beispielsweise keramische Lager), kann dieses Verfahren eingesetzt werden. Zur Herstellung kleiner Strukturen wird dazu die Oberfläche mit einem lichtempfindlichen Resist beschichtet und dieser strukturiert. Anschließend wird das Bauteil in dem Ätzmedium geätzt, sodass die gewünschte Struktur durch die Maske erzeugt wird.

1.3.3. Elektrochemisches Abtragen

Beim elektrochemischen Abtrag soll das elektrochemische Ätzen und das elektrochemische Formabtragen beschrieben werden. Auch wenn das elektrochemische Ätzen sowohl mit oder ohne äußere Spannungsquelle durchgeführt werden kann, wird hier nur auf das Ätzen ohne äußere Spannungsquelle eingegangen, weil es in der Anwendung einfacher ist.

1.3.3.1. Elektrochemisches Ätzen (Metallätzen)

Das Metallätzen ähnelt dem chemischen Abtrag in der praktischen Anwendung stark. Bei Metallen ist der Abtragsprozess jedoch anders, denn beim elektrochemischen Ätzen kommt es durch den Kontakt von Werkstoff und Ätzmedium zur elektrischen Elementbildung; es entsteht gewissermaßen eine Batterie. Das Werkstück stellt dabei die Anode dar und Metallionen werden entfernt. Eine typische Anwendung ist die Strukturierung von Leiterplatten für elektrische Schaltungen. Hier wird ebenfalls, wie beim chemischen Abtragen, mit Photoresisten zur Herstellung von Strukturen gearbeitet. Das Verfahren ist bei Ätztiefen bis etwa 200 µm wirtschaftlich einsetzbar [52]. Es lassen sich sehr kleine Strukturgrößen damit erreichen, die primär durch die Möglichkeiten der vorhandenen Photolithographie beschränkt sind.

Die Lithographie bereitet bei der Übertragung auf gekrümmte Oberflächen einen erheblichen Aufwand. Die in der Mikrosystemtechnik üblichen Belackungsanlagen und Belichter sind auf planare Substrate ausgelegt. Bei zylindrischen Flächen ist eine Tauch- oder Sprühbelackung mit anschließender Belichtung mittels flexibler Folienmasken möglich. Bei Freiformflächen muss bei der Belichtung auf Laser- oder Elektronenstrahlbelichter zurückgegriffen werden. Hinzu kommt, dass durch Ausheizschritte und Haltezeiten zur Rehydrierung der Lacke relativ lange Prozesszeiten von etwa 30 Minuten für eine komplette Strukturierung entstehen. Dabei kann die eigentliche Ätzung je nach Material und Ätzmedium zwischen wenigen Sekunden und einigen Minuten in Anspruch nehmen. Das Verfahren ist damit aufgrund des hohen technologischen und zeitlichen Aufwands für sehr große Stückzahlen nicht notwendig und daher zu teuer, wenn die minimalen Strukturgrößen größer als etwa 50 µm sind.

1.3.3.2. Elektrochemisches Formabtragen

Beim elektrochemischen Formabtragen oder elektrochemischem Abtragen wird mit äußerer Stromquelle gearbeitet. Das Werkstück, von dem Material entfernt werden soll, wird als Anode geschaltet, die Gegenelektrode als Kathode. Zwischen Anode und Kathode befindet sich ein leitfähiger Elektrolyt, der je nach Material des Werkstücks ausgewählt wird. Dabei haben sich Elektrolyte aus NaNO_3 oder NaCl für die Bearbeitung von Stählen als ideal herausgestellt [53]. Eine wesentliche Eigenschaft des Prozesses ist der fehlende Kontakt zwischen Werkstück und Werkzeug. Anders als beim Funkenerodieren findet der Abtrag über die gesamte Werkzeugfläche statt und das Werkzeug verschleißt nicht.

Abbildung 1.11 zeigt die klassische Vorstellung zur Metallauflösung an der Anode. Ob diese Vorgänge so auch in hochkonzentrierten Elektrolyten auftreten, ist eine offene wissenschaftliche Frage [54]. Das Modell hilft aber bei der Vorstellung der ablaufenden

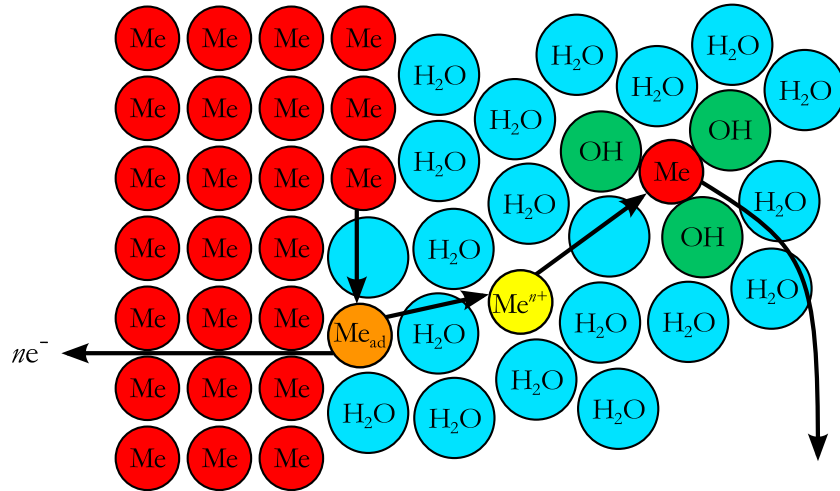


Abbildung 1.11. Klassisches Modell zur Metallauflösung. Das Ad-Atom ist ein Zwischenschritt vom im Gitter gebundenen Atom hin zum hydratisierten Atom.

Vorgänge. Kaesche [55] beschreibt drei wesentliche Schritte, die an der Anode ablaufen. Zunächst wird aus einem fest im Gitter verankerten Atom (rot) ein adsorbiertes Atom (orange). Dieses kann sich seitlich frei auf der Werkstückoberfläche bewegen.

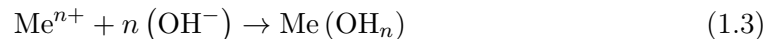


Anschließend tritt das Atom durch die Doppelschicht an der Anode hindurch. Es gibt dabei Valenzelektronen ab und liegt daraufhin als Ion (gelb) im Elektrolyten vor.



Als Doppelschicht wird die Grenze zwischen Elektrolyt (Ionenleiter) und Elektrode (Elektronenleiter) bezeichnet. An der positiv geladenen Anode stehen den Atomen auf der Elektrolytseite negativ geladene Ionen gegenüber, an der Kathode lagern sich positiv geladene Ionen an. Diese Doppelschicht bewirkt eine Abschirmung der Anode von dem elektrischen Feld, sodass dieses aus Sicht der Anode geringer ausfällt. Die Dicke der Schicht ist von der Beweglichkeit der Ionen, der Konzentration des Elektrolyten und der Elektronendichte des Metalls abhängig.

Durch Migration und Diffusion werden die Metallionen von dem Werkstück in das Lösungsinere transportiert. Hier verbinden sich die Metallionen mit OH^- -Gruppen (grün), die durch die Bildung von Wasserstoff an der Kathode entstehen ($2\text{H}_2\text{O} + 2e^- \rightarrow \text{H}_2 + 2\text{OH}^-$):



Dieses Metallhydroxid fällt aus und wird als Schlamm aus der Elektrolytlösung entfernt.

Während an der Kathode Wasserstoff und Hydroxidionen gebildet werden, hängt die Bildung von Sauerstoff an der Anode bei der Bearbeitung von Eisen unter Verwendung von Natriumnitrat-Elektrolyten stark von der wirkenden Stromdichte ab. Bei einer

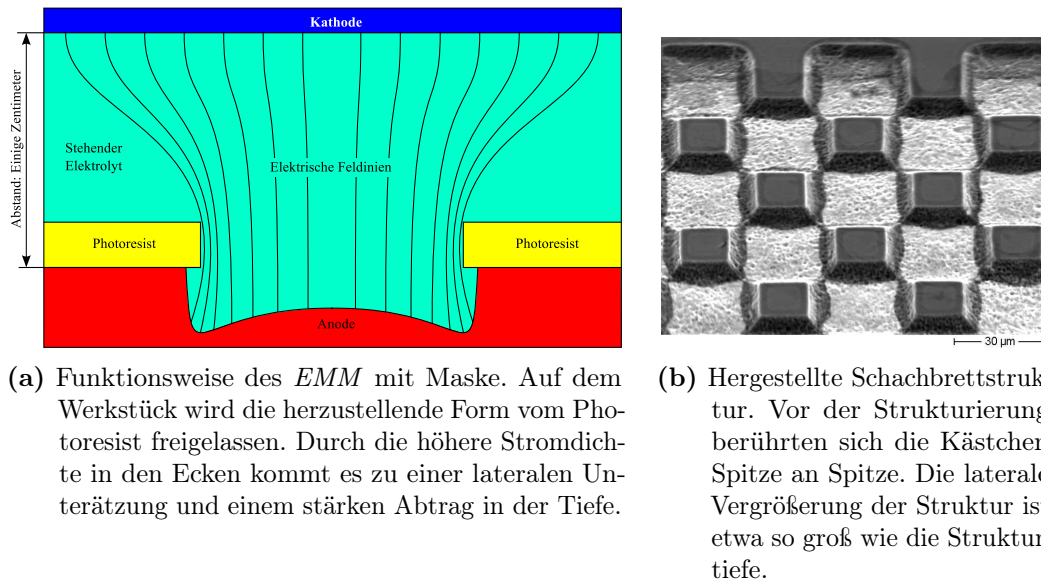


Abbildung 1.12. Mikroelektrostrukturieren mit Maske aus Photoresist auf dem Werkstück.

Stromdichte von 30 A/cm^2 beträgt der Anteil der Sauerstoffbildung nur noch 10 %. Ab 40 A/cm^2 kann davon ausgegangen werden, dass nur noch Eisenionen gelöst werden und keine nennenswerte Sauerstoffbildung stattfindet. Es bilden sich Fe^{2+} - und Fe^{3+} -Ionen im Verhältnis 1 : 2. [56]

Zur Herstellung von Strukturen auf der Werkstückoberfläche muss der Materialabtrag lokal erfolgen. Die Herstellung von Mikrostrukturen mit elektrochemischen Verfahren wird als Mikro-Elektrostrukturieren (engl. *Electrochemical Micro Machining*, *EMM*) bezeichnet. Die Stromdichte liegt dabei zwischen 75 A/cm^2 und 100 A/cm^2 . Meist wird der elektrische Strom im Bereich von einigen Hz bis hin zu einigen MHz gepulst. Die erreichbare laterale Auflösung liegt im Bereich von 50 µm , in einigen Fällen auch darunter. Die typische Abtragsgeschwindigkeit liegt bei etwa 5 µm/min . Die Fließgeschwindigkeit des Elektrolyten liegt typischerweise unter 3 m/s . [57]

Beim Mikro-Elektrostrukturieren wird zwischen Prozessen mit und ohne Maske unterschieden. Die jeweiligen typischen Eigenschaften und Funktionsweisen, sowie Ergebnisse dieser Prozesse werden im Folgenden beschrieben.

Abbildung 1.12 zeigt die prinzipielle Funktionsweise und ein Ergebnis des Mikro-Elektrostrukturierens mit Maske. Das Werkstück (Anode) wird partiell von einem photostrukturierbaren Resist geschützt. Die Kathode ist einige Zentimeter von der Anode entfernt; beide Elektroden befinden sich in Kontakt mit dem Elektrolyten.

Das Verfahren ist sehr interessant, um beispielsweise Löcher in metallische Folien einzubringen. Die Herstellung der Scherfolien von Rasierapparaten ist eine typische An-

wendung. Datta *et al.* [58] stellte mit dem Verfahren hochpräzise Düsen her. Aber auch zur Oberflächenfunktionalisierung können kleine Gruben genutzt werden [59]. Entsprechend finden sich in der Literatur zahlreiche Quellen, die sich mit der Herstellung von Löchern oder Gruben und den damit verbundenen Gegebenheiten befassen.

Die Stromdichteverteilung auf dem Werkstück ist ein kritischer Faktor. Wie in Abbildung 1.12a dargestellt ist, gibt es in den Ecken der Strukturen eine lokal erhöhte Stromdichte. Dadurch wird bei kleinen Strukturturen und großen Öffnungen in Relation zur Lackdicke ein umlaufender, tieferer Graben erzeugt. Erst bei zunehmender Strukturhöhe steigt der Abtrag in der Mitte der Struktur an und kugelförmige Löcher werden erzeugt. Zahlreiche Veröffentlichungen beschreiben den Fortschritt des Abtrags theoretisch und experimentell [60, 61, 62, 63, 64, 65]. Aber nicht nur innerhalb einer einzelnen Struktur kommt es durch die Stromdichteverteilung zu unterschiedlichen Abtragsraten, sondern auch durch verschieden große, nebeneinander liegende Strukturen [61, 66].

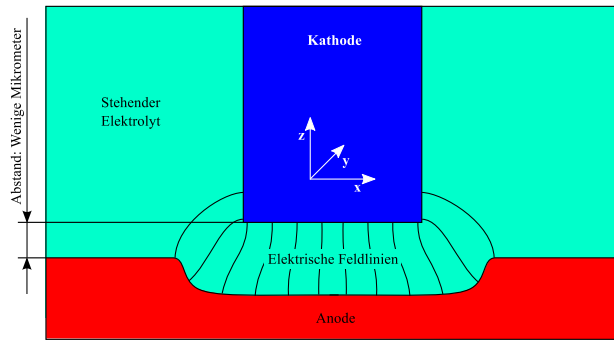
Durch die Nutzung von Photoresisten ist man bei der Herstellung an die gleichen Zwänge gebunden, die auch beim Ätzen herrschen. Zwar lassen sich mittels direktschreibender Belichtungsverfahren mit UV- oder Elektronenstrahlen auch gekrümmte Substrate strukturieren [67], der technologische und zeitliche Aufwand ist jedoch weiterhin hoch.

Mikro-Elektrostrukturieren ohne die Verwendung von Masken stellt ein direktschreibendes Verfahren dar. Analog zum Mikro-Funkenerodieren werden hier dünne Werkzeugelektroden mit einigen zehn Mikrometern Durchmesser verwendet. Abbildung 1.13 zeigt das Funktionsprinzip und eine mit diesem Verfahren hergestellte Struktur. Im Gegensatz zum Elektrostrukturieren mit Maske ist hier die Werkzeugelektrode nur wenige Mikrometer von dem Werkstück entfernt. Anode und Kathode lassen sich in der Regel in drei Raumrichtungen zueinander ausrichten, sodass die Strukturen sequenziell in die Oberfläche geschrieben werden [68, 69, 70, 57].

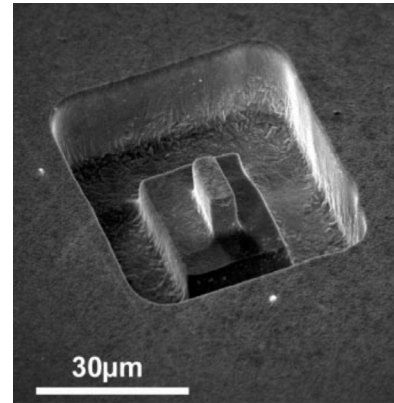
Bei dem Prozess lassen sich zahlreiche Parameter optimieren. Dies betrifft hauptsächlich den Aufbau der Werkzeugelektroden sowie die Nutzung einer gepulsten elektrischen Spannung.

Um das seitliche Streuen des elektrischen Feldes zu unterbinden, kann die Werkzeugelektrode seitlich isoliert werden [28]. Lee *et al.* [72] gehen noch einen Schritt weiter und nutzen eine zusätzliche, elektrisch leitfähige Schicht, die außen auf der Isolation aufgebracht wird. Dadurch wird eine weitere Konzentration des elektrischen Feldes zwischen Anode und Kathode erreicht. Aber auch scheibenförmige Gegenelektroden kommen aus diesem Grunde zum Einsatz [73]. Hier wird der unterschiedliche elektrische Widerstand durch eine unterschiedliche Entfernung der Kathode von der Anode ausgenutzt. Zudem ermöglichen diese scheibenförmigen Werkzeugelektroden auch Hinterschneidungen sowie tonnenförmige Löcher.

Eine Konzentration des elektrischen Feldes lässt sich auch durch die Pulsung der elektrischen Spannung erreichen. Zwischen Anode und Kathode stellt der Elektrolyt einen elektrischen Widerstand dar. Zusätzlich wirken die jeweiligen Doppelschichten an Anode und Kathode wie Kapazitäten. Schuster *et al.* [71, 74] haben erstmals ultrakurze Pulse im Nanosekunden-Bereich verwendet. Die Zeitkonstante (Produkt der Kapazitäten der Doppelschichten und des Widerstandes des Elektrolyten) zum Laden der Doppelschichten



(a) Funktionsweise des maskenlosen EMM. Die Kathode aus Draht ist gegenüber der Anode in allen Richtungen verstellbar. Auf diese Weise wird die Struktur seriell in die Werkstückoberfläche eingebracht.



(b) Schuster *et al.* nutzten eine Werkzeugkathode mit $10\text{ }\mu\text{m}$ Durchmesser zur Herstellung dieser Struktur in Kupfer. Der kleine Quader ist $5\text{ }\mu\text{m}$ mal $10\text{ }\mu\text{m}$ mal $12\text{ }\mu\text{m}$ groß. Aus [71]. Reproduktion mit Erlaubnis der AAAS.

Abbildung 1.13. Maskenloses Mikroelektrostrukturieren.

an den Elektroden ist damit klein genug, um bei Elektrodenabständen im Mikro- oder Nanometerbereich eine ausreichende Ladungsmenge bereitzustellen. Weil die elektrochemischen Reaktionen exponentiell von der Spannungsdifferenz in der Doppelschicht abhängen, wird der Materialabtrag stark auf diese Regionen eingeschränkt. Die Autoren konnten damit eine freistehende, $2,5\text{ }\mu\text{m}$ breite Zunge aus Kupfer sowie die Struktur in Abbildung 1.13b herstellen.

Weitere Arbeiten auf dem Gebiet übertragen Technologien des funkenerosiven Abtrags auf das elektrochemische Abtragen. So kann das Werkzeug das negative Abbild der herzustellenden Struktur darstellen [75], es werden mehrere Werkzeugspitzen parallel verwendet [57, 76, 77, 23, 78] oder es kommt ein durchlaufender Draht als Werkzeugelektrode zum Einsatz [79].

Die Prozesskontrolle ist ebenfalls ein wichtiges Feld der wissenschaftlichen Untersuchungen. DeSilva und McGeough [80] beschreiben die Entstehung und Erkennung von Funkenüberschlägen, Lichtbögen und Kurzschlüssen, die sich allesamt negativ auf das Strukturierungsergebnis auswirken. Munda *et al.* [81] entwickelten ein mathematisches Modell, mit dem sich, zusätzlich mit einer Ultraschall-Vibration der Werkzeugelektrode [82], optimale Prozessparameter für Spannung, Frequenz und Elektrolytkonzentration finden lassen. Yong *et al.* [83] analysierten den zwischen den Elektroden fließenden elektrischen Strom und entwickelten darauf basierend eine Prozesssteuerung, die den Arbeitsabstand zwischen den Elektroden konstant hält.

Weil es sich bei dem maskenlosen Mikro-Elektrostrukturieren um ein direktschreiben-

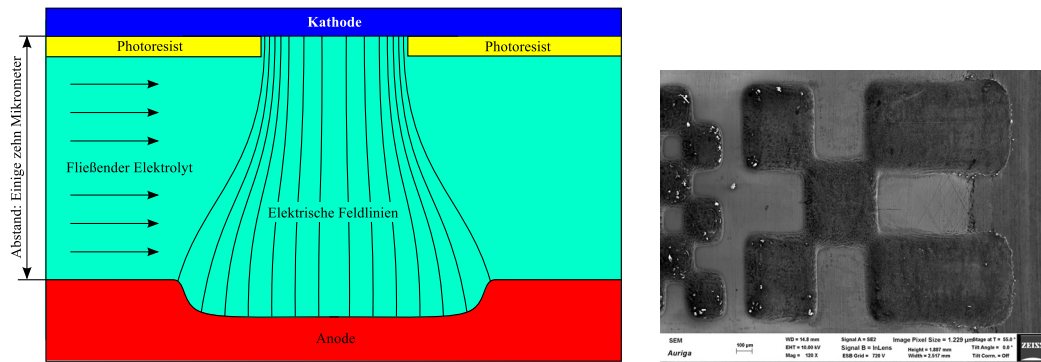
Tabelle 1.1. Eigenschaftsvergleich des Mikro-Elektrostrukturierens mit und ohne Maske.

Mikro-Elektrostrukturieren...		
	... mit Maske	... ohne Maske
Vorteile	Schnelle Strukturierung	Keine vorbereitenden Prozesse notwendig
	Präzision nur durch Lithographie beschränkt	Dreidimensionale Strukturen herstellbar
	Einfache Durchführung der Strukturierung, keine exakte Positionierung der Elektroden zueinander notwendig	Durch vorhandene Kinematik auch auf gekrümmten Oberflächen anwendbar
		Homogenere Feldverteilung zwischen Werkzeug und Werkstück als bei <i>EMM</i> mit Maske
Nachteile	Lithographie dauert lange	Langsame Strukturierung
	Ungleichmäßiger Strukturierungsfortschritt durch inhomogenes elektrisches Feld	Aufwändige Kinematik zur dreidimensionalen Positionierung von Werkzeug und Werkstück zueinander notwendig
	Auf nicht-planaren Substraten nur mit erheblichem Aufwand durchführbar	

des Verfahren handelt, ist mit der notwendigen, dreidimensionalen Positionierung von Werkstück und Werkzeug im Mikrometerbereich zueinander ein relativ hoher apparativer Aufwand notwendig. Zudem ist das Verfahren mit einer Schreibgeschwindigkeit von etwa $0,5 \mu\text{m/s}$ [84] langsam. Zwar entfallen die beim Elektrostrukturieren mit Maske notwendigen Vorarbeiten für die Lithographie, das Verfahren ist jedoch im Vergleich mit der ebenfalls direkt schreibenden Laserablation (40 mm/s) wesentlich langsamer.

Tabelle 1.1 zeigt die jeweiligen Vor- und Nachteile des Mikro-Elektrostrukturierens mit und ohne Maske. Für die am Anfang des Kapitels (Seite 12) genannten Anforderungen wäre ein Prozess wünschenswert, der die jeweiligen Vorteile beider Prozesse vereint, ohne die jeweiligen Nachteile in Kauf nehmen zu müssen.

Ein solcher Prozess wurde von Schöneberger und Roy [85, 86] in seinen Grundzügen vorgestellt. Abbildung 1.14 stellt das Prinzip und ein Strukturierungsergebnis dar. Anstelle einer stabförmigen Gegenelektrode, wie sie beim maskenlosen Prozess verwendet wird, kommt hier eine strukturierte Gegenelektrode zum Einsatz. Diese ist planar und enthält die zu übertragende Struktur als leitfähige Flächen, während der Rest elektrisch isoliert ist. Diese Gegenelektrode befindet sich in einigen Mikrometern Abstand zum Werkstück.



(a) Funktionsweise des *EMM* mit strukturierter Gegenelektrode. Weil sich die strukturgebende Schicht auf der Gegenelektrode befindet, kommt es auch hier zur Konzentration der Stromdichte. Das hat zur Folge, dass sich keine seitlichen Gräben in der hergestellten Struktur bilden können.

(b) Hergestellte Schachbrettstruktur auf einer zylindrischen Oberfläche mit 36,5 mm Durchmesser. Die laterale Vergrößerung der Strukturgröße ist etwa so groß wie die Strukturtiefe.

Abbildung 1.14. Mikroelektrostrukturieren mit strukturierter Gegenelektrode.

Die Struktur wird über das lokal begrenzte elektrische Feld übertragen. Damit wird das Problem der inhomogenen Feldverteilung vom Werkstück auf das Werkzeug verlagert. Um die Reaktionsprodukte sowie entstehende Blasen zu entfernen, wird der Elektrolyt mit einer Geschwindigkeit von einigen m/s zwischen den beiden Elektroden hindurchgepumpt.

Die Autoren verwendeten eine Gegenelektrode aus Kupfer, um damit eine ebenfalls aus Kupfer bestehende Probe zu strukturieren. Die leitfähigen Flächen auf der Gegenelektrode bestanden aus zahlreichen 100 μm mal 100 μm großen Quadraten, die einen Abstand von 200 μm zueinander hatten. Der Abstand zwischen Werkzeugelektrode und dem Werkstück wurde über eine entsprechende Halterung innerhalb einer Flusszelle auf 500 μm eingestellt. Die Stromdichte wurde zwischen 1 A/cm² und 7 A/cm² ohne Pulsung des Stroms variiert. Die hergestellten quadratischen Strukturen hatten nach 180 s bei 1 A/cm² eine Tiefe von 1,5 μm und eine Seitenlänge von 120 μm .

In der vorliegenden Arbeit wird der Prozess dahingehend weiterentwickelt, dass

- der Arbeitsabstand zwischen den Elektroden von 500 μm auf 20 μm verringert und damit eine höhere laterale Auflösung ermöglicht wird,
- die Stromdichte zur Verringerung der Oberflächenrauheit von 7 A/cm² auf 100 A/cm² gesteigert wird,
- die Gegenelektroden zur Bearbeitung zylindrischer Oberflächen flexibel gestaltet werden
- und durch einen mehrlagigen Aufbau der Gegenelektroden verschiedene, unterschiedlich tiefe und präzise zueinander ausgerichtete Strukturen hergestellt werden

können.

Abbildung 1.14b zeigt eine Schachbrettstruktur, die im Rahmen der vorliegenden Arbeit auf der zylindrischen Lauffläche eines Zylinderrollenlagers mit 36,5 mm Durchmesser in unter 20 s hergestellt wurde. Außer einer vorbereitenden Entfettung des Werkstücks und einer anschließenden Spülung sind keine weiteren Prozessschritte notwendig. Damit erfüllt der Prozess durch die Nutzung der in Tabelle 1.1 beschriebenen Vorteile unter Vermeidung aller genannten Nachteile die zu Beginn des Kapitels genannten Anforderungen hinsichtlich der Bearbeitung gehärteter Stähle, gekrümmter Oberflächen, der Herstellung dreidimensionaler Strukturen und der kurzen Prozesszeiten.

1.4. Aufbau der Arbeit

Zunächst wird der Abtragungsprozess theoretisch untersucht. Dazu wird in Kapitel 2 sowohl ein Modell mit der Finite-Elemente-Methode (FEM) (Abschnitt 2.1) als auch ein analytisches Modell (Abschnitt 2.2) entwickelt und die jeweiligen Ergebnisse vorgestellt. Das Hauptaugenmerk liegt auf dem Einfluss der gelösten Metallionen auf das Strukturergebnis, weil sich in dem Kanal zwischen Werkstück und Gegenelektrode der elektrische Widerstand durch diese lokal ändert. Mit beiden Modellen wird der Einfluss auf die Strukturtiefe untersucht und die Ergebnisse miteinander verglichen. Mit dem FEM-Modell wird zusätzlich die erreichbare Strukturauflösung in Abhängigkeit von dem Elektrodenabstand untersucht. Das analytische Modell ist zudem in der Lage, den Einfluss der Geometrie des fluidischen Kanals auf die Strömungsgeschwindigkeit des Elektrolyten, der damit verbunden Metallionenkonzentration und damit dem Strukturierungsergebnis zu berechnen. Aus diesen Ergebnissen werden Designregeln abgeleitet, die in die Fertigung der Gegenelektroden einfließen.

Kapitel 3 beschreibt die praktische Herstellung der Gegenelektroden. Diese werden mit den Technologien der Mikrosystemtechnik hergestellt. In dem Kapitel wird sowohl die Herstellung planarer (Abschnitt 3.1), flexibler (Abschnitt 3.2) als auch flexibler, mehrlagiger Gegenelektroden (Abschnitt 3.3) beschrieben. Dabei wird detailliert auf die verwendeten Prozesse und Materialien eingegangen.

In Kapitel 4 erfolgt die Beschreibung der praktischen Umsetzung des entwickelten Fertigungsprozesses. Dazu wird zunächst der Aufbau der notwendigen Geräte und deren Ansteuerung beschrieben (Abschnitt 4.1). Ein besonderes Augenmerk liegt auf der Beschreibung des mechanisch-fluidischen Aufbaus für die unterschiedlichen Typen der Gegenelektroden (Abschnitt 4.1.1). Anschließend werden die elektrische Ansteuerung (Abschnitt 4.1.2) und die untersuchten Elektrodendesigns (Abschnitt 4.1.3) beschrieben. Die praktischen Ergebnisse werden abschließend mit den jeweiligen Berechnungen des FEM- und des analytischen Modells verglichen (Abschnitt 4.2).

2. Modellierung

Dieses Kapitel behandelt die Modellierung des Strukturierungsprozesses. Dies geschieht zunächst mit einer FEM-Simulation, bei der nach Möglichkeit sämtliche Einflussparameter berücksichtigt werden. Mit diesem Modell werden sowohl über das Strukturprofil als auch über die erreichbare Strukturauflösung Aussagen getroffen. Anschließend werden zahlreiche Vereinfachungen vorgenommen, um den Rechenaufwand für das analytische Modell beherrschbar zu machen und abschätzen zu können, in wie weit diese Vereinfachungen das Ergebnis beeinflussen. Abschließend werden beide Modelle verglichen und Designregeln werden abgeleitet.

Über die Gegenelektrode wird die Form der Struktur (Draufsicht) vorgegeben; die Strukturtiefe und deren Profil (Schnittansicht) werden durch zahlreiche Parameter beeinflusst, die im Folgenden untersucht werden sollen. Abbildung 2.1 zeigt diese einzelnen Prozessparameter, die Vorgaben für den Prozess und die Art und Weise ihrer gegenseitigen Beeinflussung.

Die Breite und Höhe des fluidischen Kanals werden durch das Design des Kanals vorgegeben. Zusammen mit dem Druck des Elektrolyten, der durch eine Pumpe bereitgestellt wird, beeinflussen sie zunächst die Geschwindigkeit des Elektrolyten. Die vorgegebene Stromdichte gibt die Stromdichte über die gesamte Gegenelektrode vor. Über die Prozessdauer und indirekt über die Stromdichte wird dann die Strukturtiefe und das Strukturprofil bestimmt. Es wird bei der Simulation davon ausgegangen, dass diese Vorgegebenen Parameter während des Prozesses konstant bleiben.

Durch die Lösung von Metallionen während des Prozesses beeinflussen sich die Parameter gegenseitig. Die Bewegung des Elektrolyten bewirkt, dass die gelösten Metallionen fortgespült werden (Konvektion). Dadurch ändert sich ihre Verteilung innerhalb des Kanals, was wiederum lokal die Leitfähigkeit des Elektrolyten beeinflusst. Diese Leitfähigkeit setzt sich zusammen aus der Leitfähigkeit durch die im Wasser gelösten Salze und der Leitfähigkeit durch die während des Prozesses gelösten Metallionen. Es wird davon ausgegangen, dass die Leitfähigkeit durch die Salze konstant bleibt. Damit ändert sich durch die Metallionen in dem Elektrolyten und damit auch auf dem Werkstück lokal die Stromdichte. Diese wiederum beeinflusst das elektrische Feld und damit die Diffusionsgeschwindigkeit der Metallionen auf ihrem Weg von der Anode zur Kathode.

Der Materialabtrag ist, eine hinreichend hohe Stromdichte vorausgesetzt, direkt proportional zur Stromdichte auf dem Werkstück (erstes Faradaysches Gesetz). Damit wird das Material auf dem Werkstück nicht an allen Stellen mit der gleichen Rate abgetragen. Die entstehende Struktur beeinflusst über ihre Geometrie, hauptsächlich über die Veränderung der Höhe des Kanals, die lokale Stromdichteverteilung. An Spitzen nahe an der Gegenelektrode erhöht sich die Stromdichte, in weiter von der Gegenelektrode entfernten Tälern sinkt die Stromdichte, wodurch sich wiederum die Abtragsrate ändert. Aber auch

2. Modellierung

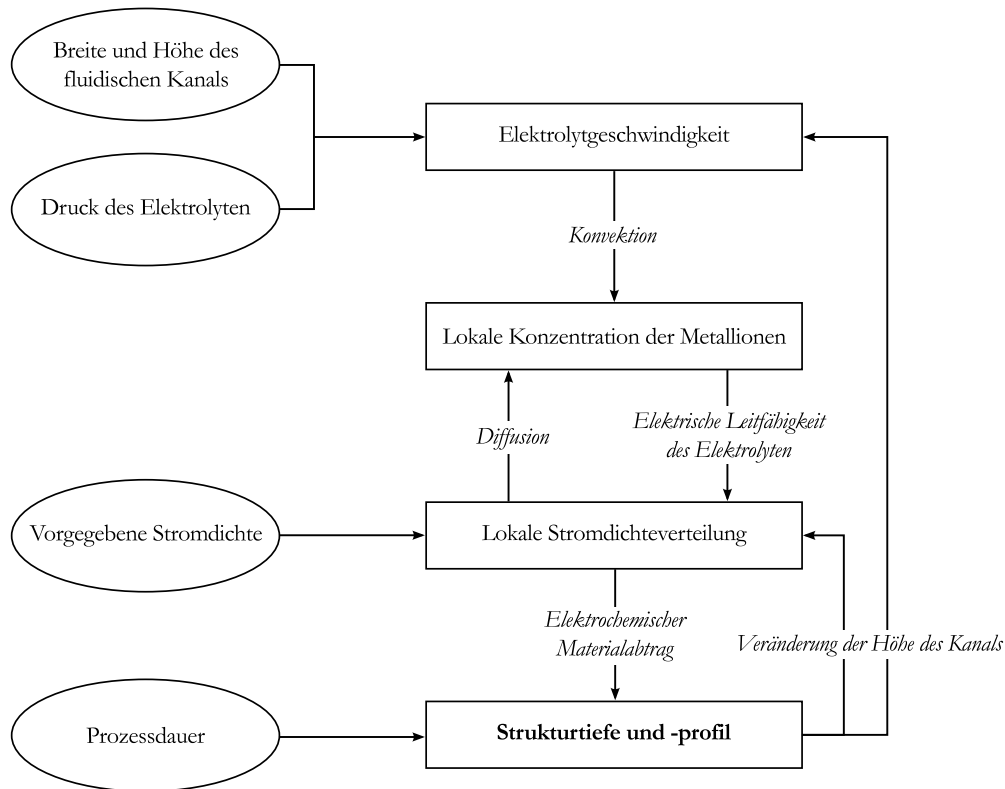


Abbildung 2.1. Gegenseitige Beeinflussung der Prozessparameter.

die Geschwindigkeit des Elektrolyten ändert sich durch eine geänderte Kanalhöhe bei konstantem Druck. Da die Höhe des Kanals wesentlich kleiner ist als seine Breite, geht sie mit einer höheren Potenz in die Geschwindigkeit ein und beeinflusst die Geschwindigkeit auch bei kleinen Änderungen maßgeblich.

2.1. FEM-Simulation

In diesem Abschnitt werden der geometrische Aufbau des FEM-Modells, die Beschreibung der einzelnen physikalischen Module und deren Parameter sowie die Solvereinstellungen beschrieben. Der Prozess wird zweidimensional simuliert, da hiermit alle relevanten Untersuchungen erfasst und ausgewertet werden können. Zudem lässt sich der Prozess dreidimensional mit der am Institut vorhandenen Hardware nicht berechnen.

Als FEM-Software kommt *COMSOL Multiphysics* zum Einsatz. Zunächst wird das gegebenenfalls vereinfachte geometrische Modell erstellt. Dies kann sowohl in der Software selbst als auch durch Datenübernahme aus Konstruktionsprogrammen erfolgen. In diesem Falle wurde das Modell in *COMSOL Multiphysics* selbst erstellt.

Die einzelnen physikalischen Einflüsse werden durch Physik-Module, sogenannte *Physics* realisiert. Diese lassen sich miteinander koppeln, sodass beispielsweise die Temperaturent-

wicklung eines stromdurchflossenen Drahtes mit Konvektion und temperaturabhängiger Widerstandsänderung des Drahtes berechnet werden kann. Entsprechend der Einflüsse in Abbildung 2.1 werden folgende *Physics* verwendet:

- *Laminar Flow (spf)* zur Simulation der Elektrolytbewegung
- *Transport of Dilutes Species (chds)* zur Simulation der Metallionenbildung und deren Bewegung
- *Electric Currents (ec)* zur Simulation des elektrischen Feldes und der Stromdichte
- *Moving Mesh (ale)* zur Simulation des eigentlichen Materialabtrags.

Die verwendeten Einstellungen werden im Abschnitt 2.1.2 näher erläutert.

COMSOL Multiphysics enthält zahlreiche Materialien mit ihren entsprechenden physikalischen Eigenschaften in einer Datenbank. Weil der im praktischen Teil verwendete Elektrolyt aus 3M NaNO₃ besteht, wird in der Simulation auf Wasser zurückgegriffen. Dessen Eigenschaften sind nahezu Deckungsgleich mit den Elektrolyteigenschaften. An Stellen, an denen die Eigenschaften abweichen (bspw. Leitfähigkeit), werden Literatur- oder eigene Messwerte verwendet. Die Parameter werden ebenfalls im Abschnitt 2.1.2 beschrieben.

Maßgeblichen Einfluss auf das Simulationsergebnis hat das verwendete *Mesh*, also das Netz, welches durch die Unterteilung des gesamten Modells in einzelne, finite Elemente entsteht. *COMSOL Multiphysics* stellt verschiedene *Meshes* und Einstellungen zur Verfügung, um das Netz zu optimieren. Die verwendeten Parameter werden im Abschnitt 2.1.3 erläutert.

Schlussendlich werden die verwendeten Einstellungen für den *Solver* beschrieben.

2.1.1. Geometrie

Es wird eine zweidimensionale Geometrie erstellt. Abbildung 2.2 zeigt schematisch den Aufbau des Systems. Gegenüber des Werkstücks (Anode, rot) befindet sich die Gegenelektrode (Kathode, blau). Der symmetrische Aufbau des Systems lässt sich nutzen und die Arbeitsebene (grün) wird in die Mitte des Kanals in das xy -Koordinatensystem gelegt ($z = 0$). Die Abmessungen von Kanal und Gegenelektrode werden als Parameter angelegt, um später parametrische Studien anfertigen zu können.

Der so auf eine Arbeitsebene reduzierte Kanal wird als Rechteck mit den Dimensionen l_{Kanal} und h_{Kanal} erstellt (Abbildung 2.3). Die Gegenelektrode (Kathode) ist eine Linie mit der Länge l_{GE} auf der Oberkante des Rechtecks. Der Einlauf für den Elektrolyten befindet sich links, der Auslauf rechts. Die Ein- und Auslauflängen sind gleich groß.

Das gesamte Rechteck wird als Material Wasser definiert und kommt damit dem verwendeten Elektrolyten 3M NaNO₃ sehr nahe. Abweichende Parameter werden im folgenden Abschnitt beschrieben.

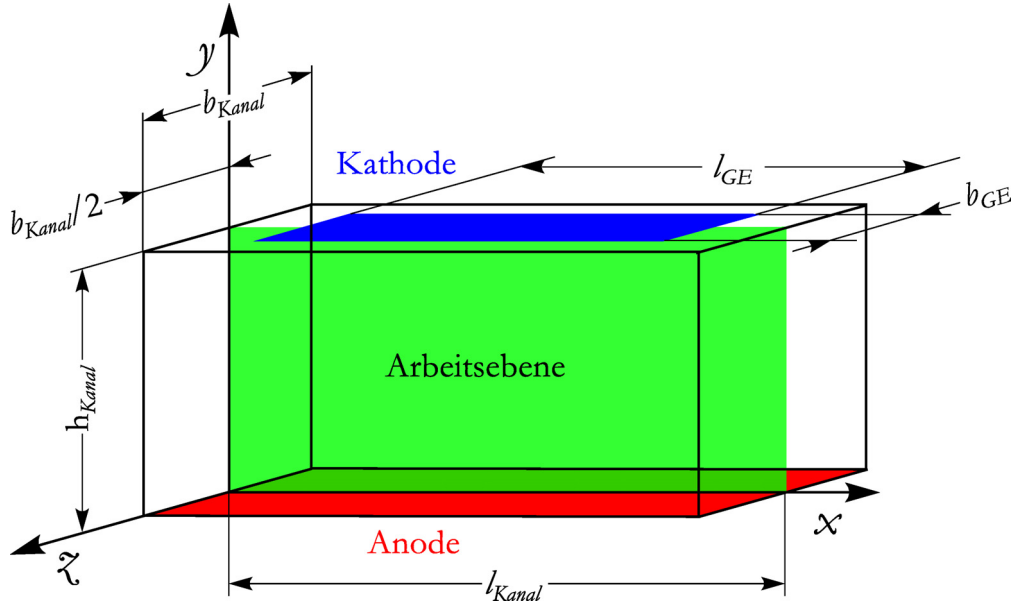


Abbildung 2.2. Schematische Darstellung des Kanals mit Definition der Arbeitsebene.

2.1.2. Physik-Module

Im Folgenden werden die Randbedingungen für die Simulation festgelegt. In diesem Fall kommen die Module *Laminar Flow (spf)*, *Transport of Diluted Species (chds)*, *Electric Currents (ec)* und *Moving Mesh (ale)* zum Einsatz. Abbildung 2.3 zeigt, in welchen geometrischen Bereichen die jeweiligen Parameter zugeordnet werden.

Laminar Flow (spf)

Es wird aufgrund der Kanalabmessungen davon ausgegangen, dass eine laminare Strömung vorliegt. Der Prozess läuft bei Raumtemperatur (293,15 K) ab. Die Oberkante (Gegenelektrode) und Unterkante (Werkstück) des Kanals werden als feste Wände modelliert. Die Randbedingung ist, dass hier keine Reibung vorliegt. Die linke Seite ($x = 0$) ist ein Einlass mit dem Druck p_{in} als Randbedingung. Die rechte Seite ist ein Auslass mit $p_{out} = 0$ Pa. Die benötigten Eigenschaften des Fluides (Dichte und dynamische Viskosität) werden von den hinterlegten Materialeigenschaften von Wasser übernommen.

Transport of Diluted Species (chds)

In diesem Modul wird der Massentransport der Metallionen durch Konvektion aufgrund des Strömungsfeldes und durch Diffusion aufgrund des elektrischen Feldes berücksichtigt. Dazu wird dieses Modul an die jeweiligen Variablen der Module *Laminar Flow (spf)* und *Electric Currents (ec)* gekoppelt.

Das Medium, in dem die Diffusion stattfindet, ist Wasser. Weiterhin werden der Diffusionskoeffizient $D_{c_Fe} = 1,812 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{Vs}$, die Mobilität $u_{m,c_Fe} = 13,9836 \times 10^{-13} \text{ s mol/kg}$

2. Modellierung

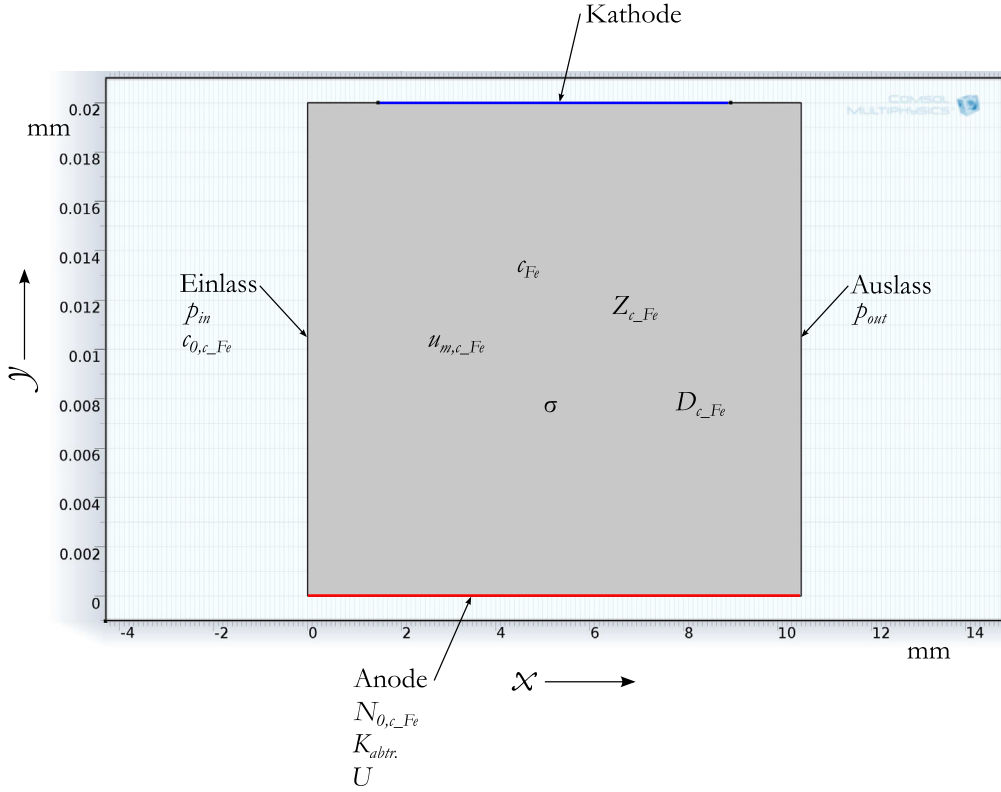


Abbildung 2.3. Kanalgeometrie in *COMSOL Multiphysics*. Der Kanal ist 20 μm hoch und 10,5 mm lang. An der Oberseite befindet sich die Gegenelektrode, welche 7,5 mm lang ist. Die komplette untere Seite stellt das Werkstück dar. Der Elektrolyt strömt von links nach rechts. Den jeweiligen geometrischen Gegebenheiten werden die für die Simulation benötigten Parameter zugeordnet (detaillierte Beschreibung in Abschnitt 2.1.2).

und die Ladungsnummer $Z_{c_Fe} = 3$ von Fe^{3+} in Wasser eingetragen [87]. Die Startkonzentration von Fe^{3+} -Ionen ist $c_{Fe} = 0$.

Analog zum Modul *Laminar Flow (spf)* ist die linke Seite des Rechtecks ein Einlass für verbrauchten Elektrolyten. Die Konzentration von Metallionen c_{0,c_Fe} ist ebenfalls null. Die rechte Seite des Kanals ist ein Auslass.

Abschließend wird der Metallioneneintrag in den Elektrolyten definiert. Dies geschieht über einen *Flux*. Der Eintrag hängt von der Ionenart und der elektrischen Stromdichte $ec.nJ$ ab und lässt sich mit dem ersten Faradaysches Gesetz berechnen. Die bewegte Stoffmenge beträgt demnach

$$N = K \cdot Q \quad (2.1)$$

wobei

$$K = \frac{1}{z \cdot F} \quad (2.2)$$

ist. Q ist die Ladungsmenge und z ist die Ladungsnummer des bewegten Ions. F ist die Faraday-Konstante und beträgt 96 485,33 C/mol. Die bewegte Menge an Fe^{3+} -Ionen für

2. Modellierung

$Q = 1$ As ist folglich

$$N = \frac{1 \text{ As}}{3 \cdot 96\,485,33 \text{ C/mol}} = 3,4547 \times 10^6 \text{ mol} \quad . \quad (2.3)$$

Der Eintrag an Metallionen in den Elektrolyten N_{0,c_Fe} ist auf der unteren Kante des Rechtecks also $3,4547 \times 10^6 \text{ mol/As} \cdot ec.nJ$. Die obere Kante hat keinen *Flux*.

Electric Currents (ec)

Zur Berechnung der Stromdichte wird die Fläche der Gegenelektrode benötigt. Die Länge ist aus der Geometrie bekannt, die Breite b_{GE} wird in diesem Modul eingetragen.

Die Leitfähigkeit über den Kanal setzt sich aus der Leitfähigkeit des Elektrolyten durch die darin gelösten NaNO_3 -Ionen und der Leitfähigkeit durch die generierten Fe^{3+} -Ionen zusammen. Die Leitfähigkeit des unverbrauchten Elektrolyten wurde mit einem Leitfähigkeitsmessgerät bestimmt und beträgt $\sigma_{3M \text{ NaNO}_3} = 16,12 \text{ S/m}$. Der Anteil der generierten Metallionen lässt sich mit Hilfe der ionischen Leitfähigkeit λ berechnen. $\lambda_{\text{Fe}^{3+}}$ beträgt $204 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ S/mol}$ [87]. Diese wird an die Metallionenkonzentration c_{Fe} aus dem Modul *Transport of Diluted Species (chds)* gekoppelt:

$$\sigma = 16,12 \text{ S/m} + (204 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ S/mol} \cdot c_{Fe}) \quad . \quad (2.4)$$

Die linken und rechten Seiten der Geometrie sind elektrisch isoliert, ebenso wie die Bereiche des Ein- und Auslaufs auf der oberen Kante. Die Gegenelektrode ist geerdet. Gegenüber dieser wird für die untere Kante, das Werkstück, ein elektrisches Potential U definiert. U berechnet sich aus der Leitfähigkeit des frischen Elektrolyten, der Kanalgeometrie und der geforderten Stromdichte J :

$$U = \frac{J \cdot l_{GE}^2 \cdot b_{GE}^2 \cdot h_{Kanal}}{\sigma_{3M \text{ NaNO}_3}} \quad . \quad (2.5)$$

Moving Mesh (ale)

Der fortschreitende Materialabtrag wird durch die Bewegung des Netzes simuliert. Ohne dieses *Moving Mesh* würde sich das Netz nur deformieren, seine äußere Gestalt würde jedoch beibehalten werden. Die Bewegung des Netzes ist proportional zur Stromdichte.

Die gesamte Geometrie wird als *Free Deformation* mit keiner anfänglichen Verschiebung definiert. Als Randbedingung für die obere Kante (Gegenelektrode) wird ein *Prescribed Mesh Displacement* in x - und y -Richtung gesetzt, welches jeweils null ist. Damit kann sich diese Kante nicht bewegen. An der linken und rechten Kante soll hingegen eine Bewegung in x -Richtung unzulässig, in y -Richtung jedoch möglich sein. Dafür wird für diese Kanten ein *Prescribed Mesh Velocity* angelegt, bei dem nur die Geschwindigkeit in x -Richtung auf Null gesetzt wird.

Die Bewegung der Ätzfront wird für die untere Kante der Geometrie (Werkstück) definiert. Weil die Stromdichte senkrecht zur Oberfläche für den Materialabtrag maßgeblich ist, wird nicht das globale Koordinatensystem verwendet, sondern über einen weiteren

2. Modellierung

Prescribed Mesh Velocity das Koordinatensystem auf das lokale Koordinatensystem der Geometriekante (*Boundary System*) umgestellt. Die Verformungsgeschwindigkeit tangential zur Oberfläche ist null. Senkrecht dazu beträgt sie

$$K_{abtr.} \cdot (ec.nJ) \quad , \quad (2.6)$$

wobei $K_{abtr.}$ der Abtragsfaktor ist und $ec.nJ$ die Stromdichte, die senkrecht zur Oberfläche wirkt. Damit ist gewährleistet, dass auch bei Verformung des Netzes der Abtrag immer normal zu Oberfläche stattfindet. $K_{abtr.}$ lässt sich mit dem ersten Faradayschen Gesetz berechnen. Mit dem Ergebnis aus Gleichung 2.3 und dem molaren Volumen von Eisen $V_{m,Fe} = 7,09 \text{ m}^3/\text{mol}$ erhält man

$$K_{abtr.} = 2,4494 \times 10^{-11} \text{ m}^3/\text{As} \quad . \quad (2.7)$$

2.1.3. Netz

Als Netz kommt ein *Mesh* mit dreieckigen Elementen zum Einsatz. Dieses *Free-Triangular Mesh* bezieht die gesamte Geometrie ein. Seine Größe wird auf *Extremely Fine* eingestellt, welches die kleinstmögliche Einstellung ist. Zusätzlich wird das Netz über ein *Refine* dreimal verfeinert.

Da im Solver ein automatisches Neuvernetzen eingestellt wird (siehe Abschnitt 2.1.4), kommt bei den Einstellungen für das Netz noch eine *Deformed Configuration* hinzu, bei der keine weiteren Einstellungen vorgenommen werden können.

2.1.4. Solver

Die zur Lösung der Simulation verwendeten Parameter werden in diesem Abschnitt beschrieben. Dies beinhaltet sowohl die Beschreibung der Simulationsschritte als auch die Konfiguration des *Solvers*.

Die Lösung des Problems ist zeitabhängig, denn es soll untersucht werden, wie die Ätzfront sich entwickelt. Vor der zeitabhängigen Lösung wird zunächst eine stationäre Lösung als Startwert für die zeitabhängige Lösung berechnet. Dies hat Vorteile bezüglich der Berechnungsgeschwindigkeit und der Genauigkeit.

Im ersten Schritt (*Stationary*) werden nur die Module *Laminar Flow (spf)* und *Electric Currents (ac)* berücksichtigt. Damit stehen sowohl für die Strömung als auch die Stromdichte Anfangsbedingungen bereit. Als direkter *Solver* wird der *MUMPS-Solver* eingesetzt. Dieser bietet eine Implementation des Gauss-Algorithmus' für dünnbesetzte Matrizen und liefert die besten Simulationsergebnisse. Im Gegensatz zu einem iterativen *Solver* benötigt er jedoch wesentlich mehr Arbeitsspeicher. Der *Solver* beginnt mit Null als Anfangswert für die Lösungen. Die Lösung wird mittels eines *Store Solution* für den zweiten *Solver* zwischengespeichert.

Der zweite, zeitabhängige Berechnungsschritt (*Time Dependent*) berücksichtigt dann alle *Physics*-Module. Auch hier kommt wie beim ersten Schritt der *MUMPS-Solver* zum Einsatz. Die Anfangswerte werden aus der *Store Solution* übernommen. Weil es während der Simulation insbesondere bei hohen Ätztiefen leicht zu invertierten Netzelementen

Tabelle 2.1. Stufung der verwendeten Prozessparameter.

Parameter	Variable	Wert
Ladungsmenge	Q	0,1 As, 0,2 As, 0,5 As, 1 As
Kanalhöhe	h_{Kanal}	10 μm , 20 μm , 50 μm , 100 μm
Stromdichte	J	10 A/cm ² , 20 A/cm ² , 50 A/cm ² , 100 A/cm ²
Druck	p_{in}	0 bar, 0,1 bar, 0,2 bar, 0,5 bar, 1,0 bar
Kanallänge	l_{kanal}	10,5 mm
Kanalbreite	b_{Kanal}	2 mm
Länge Gegenelektrode	l_{GE}	7,5 mm
Breite Gegenelektrode	b_{GE}	450 μm

kommen kann, wird ein *Automatic Remeshing* eingefügt. Die Grenze für die minimale Netzqualität beträgt 0,05. Wenn diese verletzt wird, wird das Netz automatisch neu generiert. Als Netzqualität wird das Verhältnis aus der längsten Kante eines Elements zur kürzesten Normalen des selben Elements bezeichnet. Dieser Wert wird vereinheitlicht und beträgt bei Elementen, deren Kanten alle gleich lang sind, eins. Er hat großen Einfluss auf die Qualität des Ergebnisses, aber auch die Berechnungszeit. Die Schrittgröße und Dauer der Simulation werden hier ebenfalls eingestellt. Die Ätztiefe ist aber nicht nur abhängig von der Zeit, sondern auch von der Stromdichte. Vergleichbar werden die Ergebnisse, wenn man die geflossene Ladung betrachtet. Aus dieser wird die Gesamtprozesszeit t_P berechnet:

$$t_P = \frac{Q}{J \cdot l_{GE} \cdot b_{GE}} \quad . \quad (2.8)$$

Als Kompromiss zwischen Berechnungsdauer und Auflösung hat sich eine Unterteilung in zehn Schritte als gute Wahl gezeigt.

2.1.5. Ergebnisse

Mit dem in den vorherigen Abschnitten beschriebenen Modell werden nun die einzelnen Einflüsse aufeinander untersucht. Für das Ergebnis der Strukturierung sind vor allem die Auswirkungen auf das Ätzprofil im Verlauf des fluidischen Kanals und die erreichbare Strukturauflösung wichtig. Daher wird die Simulation mit Hinsicht auf diese beiden Zielparameter geführt. Um die Ergebnisse vergleichbar zu machen, werden die Parameter gleich gestuft (siehe Tabelle 2.1). Werden von diesen Reihen abweichende Werte verwendet, wird explizit darauf hingewiesen. Die festen Parameter zur Geometrie werden gewählt, weil sie die in den praktischen Versuchen verwendeten Werte darstellen. Die Länge des Kanals l_{Kanal} ist durch das Werkstück vorgegeben und seine Breite b_{Kanal} hat einen geringen Einfluss auf die Strömungsgeschwindigkeit, da der Kanal sehr viel flacher als breit ist (siehe Abschnitt 2.2.1).

2.1.5.1. Strukturprofil

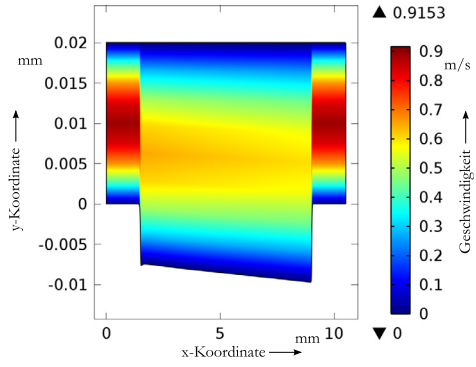
Im Folgenden werden die Einflüsse der einzelnen Parameter aus Tabelle 2.1 auf das resultierende Profil des Grabens untersucht. Exemplarisch werden in diesem Abschnitt drei Parametersätze gezeigt, anhand derer die Einflüsse gut erkennbar sind (Abbildungen 2.4 bis 2.6). Dazu wird das Geschwindigkeitsprofil (Abbildungen 2.4a, 2.5a und 2.6a), die Metallionenverteilung (Abbildungen 2.4b, 2.5b und 2.6b) und die elektrische Stromdichteverteilung (Abbildungen 2.4c, 2.5c und 2.6c) dargestellt. Um zu sehen, wie die Ätzfront fortschreitet, wird der fortschreitende Abtrag bei verschiedenen Ladungsmengen in jeder Grafik dargestellt (Abbildungen 2.4d, 2.5d und 2.6d). Abbildung 2.7 zeigt die Strukturprofile in Abhängigkeit von der Kanalhöhe im direkten Vergleich. Die kompletten Ergebnisse für alle berechneten Parameterkombinationen finden sich im Anhang (Kapitel A.3.1). Für einige Parameterkombinationen konnte keine Lösung ermittelt werden.

Bei der Stromdichte gibt es eine Besonderheit: Praktisch wird der Strom mittels Pulsweitenmodulation (PWM) gepulst. Dies geschieht, weil einerseits für eine niedrige Rauheit der strukturierten Flächen eine hohe Stromdichte notwendig ist, die Gegenelektroden andererseits durch hohe Stromdichten aber thermische Defekte davontragen würden. Außerdem kann durch das Verhältnis der Ein- und Ausschaltzeiten die effektive Geschwindigkeit der Ionen von der Anode in Richtung der Kathode gesteuert werden. Damit kann bei sehr langen Kanälen mit entsprechend langen Gegenelektroden der Niederschlag gelöster Metallionen auf der Gegenelektrode verhindert werden. Die Simulation der einzelnen Pulse würde die Rechenzeit jedoch extrem verlängern. Daher wird davon ausgegangen, dass eine reale Stromdichte von 100 A/cm^2 mit einer Pulsweite von 10 % einer mittleren Stromdichte von 10 A/cm^2 in der Simulation entspricht. Die im Folgenden angegebenen Werte für die Stromdichte entsprechen immer dem Betrieb ohne Pulsung bzw. einer um den Faktor 10 höheren Stromdichte bei einer Pulsweite von 10 %.

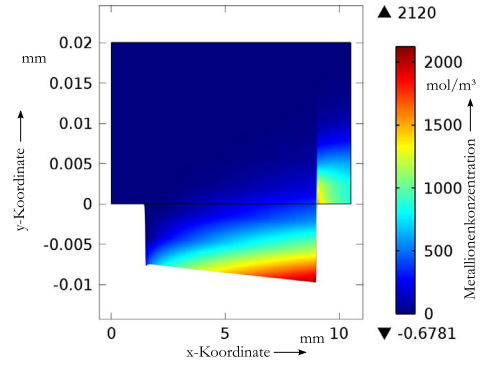
In Abbildung 2.4 ist zu sehen, dass die Strukturtiefe im Verlauf des Grabens linear ansteigt. Der Kanal ist $20 \mu\text{m}$ hoch und die Stromdichte beträgt 10 A/cm^2 . Die Druckdifferenz beträgt 1,0 bar. Das Strömungsprofil (Abbildung 2.4a) zeigt, wie sich die maximale Geschwindigkeit in der Kanalmitte von $0,92 \text{ m/s}$ auf etwa $0,6 \text{ m/s}$ im Bereich der Strukturierung verlangsamt. Die scheinbare Unstetigkeit an den Grenzen der Struktur resultiert aus der stark überhöhten Darstellung der Höhe in Relation zur Breite des Kanals. Die Ionenkonzentration hingegen nimmt im Verlauf des Kanals bis auf 2120 mol/m^3 zu (Abbildung 2.4b). Dies hat zur Folge, dass auch die Stromdichte (Abbildung 2.4c) im Verlaufe des Kanals steigt, insbesondere auf der unteren, zu ätzenden Kante. Während die Stromdichte am Anfang des Kanals die vorgegeben 10 A/cm^2 hat, steigt sie bis zum Ende des Kanals um etwa 20 %. Als Folge nimmt auch der Abtrag kontinuierlich zu, sodass er in dem Profil in Abbildung 2.4d resultiert. Auch hier ist der Kanal am Ende etwa 20 % tiefer als am Anfang.

Ein anderes Bild zeigt sich in Abbildung 2.5. Hier nimmt die Strukturtiefe nicht zu, sondern im ersten Drittel der Gegenelektrodenlänge ab, um für den Rest des Kanals eine konstante Tiefe beizubehalten. Bis auf die Kanalhöhe, die von $20 \mu\text{m}$ auf $50 \mu\text{m}$ erhöht wurde, sind alle Parameter identisch zum vorherigen Ergebnis. Durch den höheren Kanal sinkt der fluidische Widerstand, sodass bei gleichem Druckgefälle die Strömungsge-

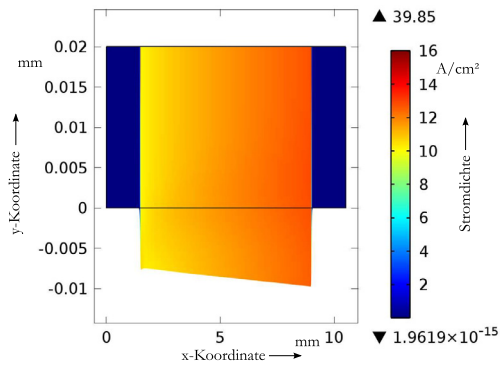
2. Modellierung



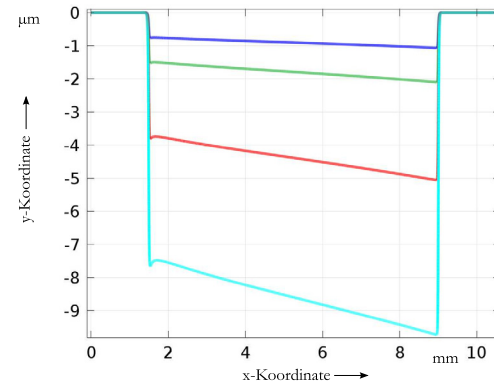
(a) Elektrolytgeschwindigkeit bei $Q = 1$ As.



(b) Metallionenkonzentration bei $Q = 1$ As.



(c) Stromdichte bei $Q = 1$ As.



(d) Profil des Grabens bei $Q = 0,1$ As, $0,2$ As, $0,5$ As und 1 As (von oben nach unten).

Abbildung 2.4. Simulationsergebnis Strukturprofil. Kanalhöhe $h_{Kanal} = 20 \mu\text{m}$, Stromdichte $J = 10 \text{ A/cm}^2$, Druck $p_{in} = 1,0 \text{ bar}$.

2. Modellierung

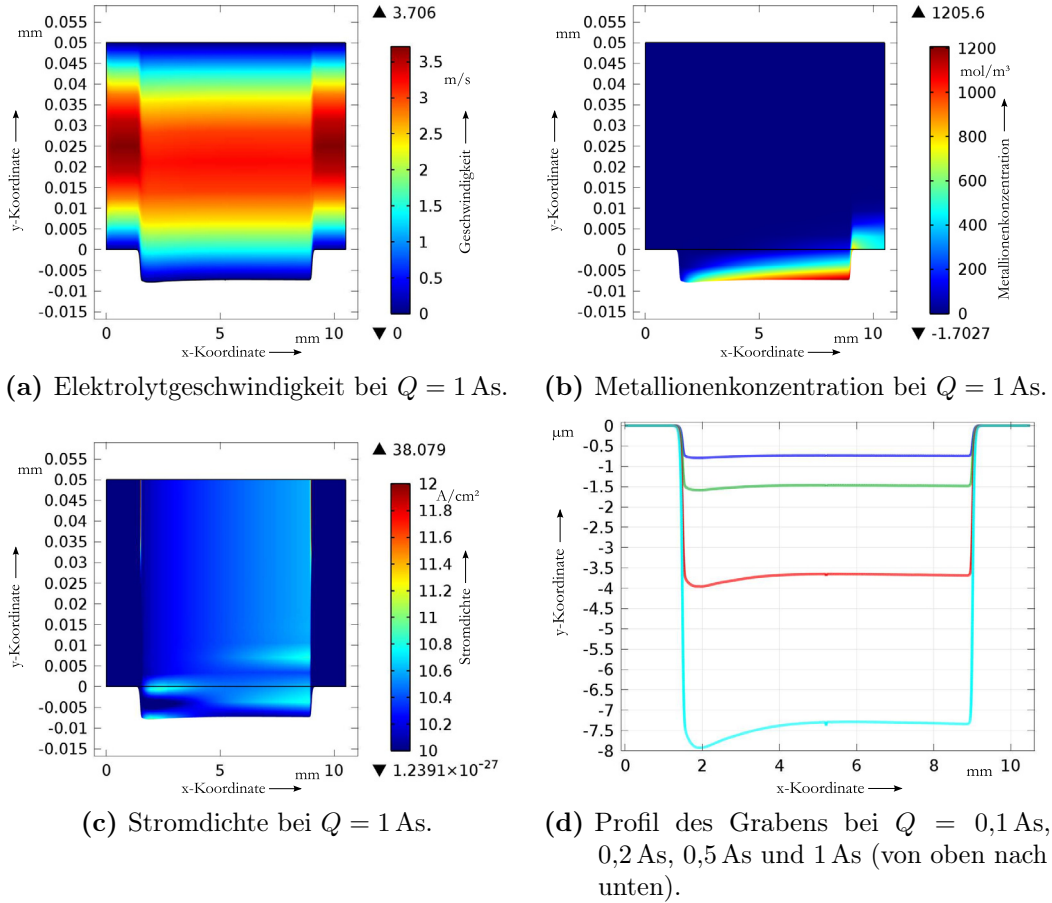


Abbildung 2.5. Simulationsergebnis Strukturprofil. Kanalhöhe $h_{Kanal} = 50 \mu\text{m}$, Stromdichte $J = 10 \text{ A/cm}^2$, Druck $p_{in} = 1,0 \text{ bar}$.

2. Modellierung

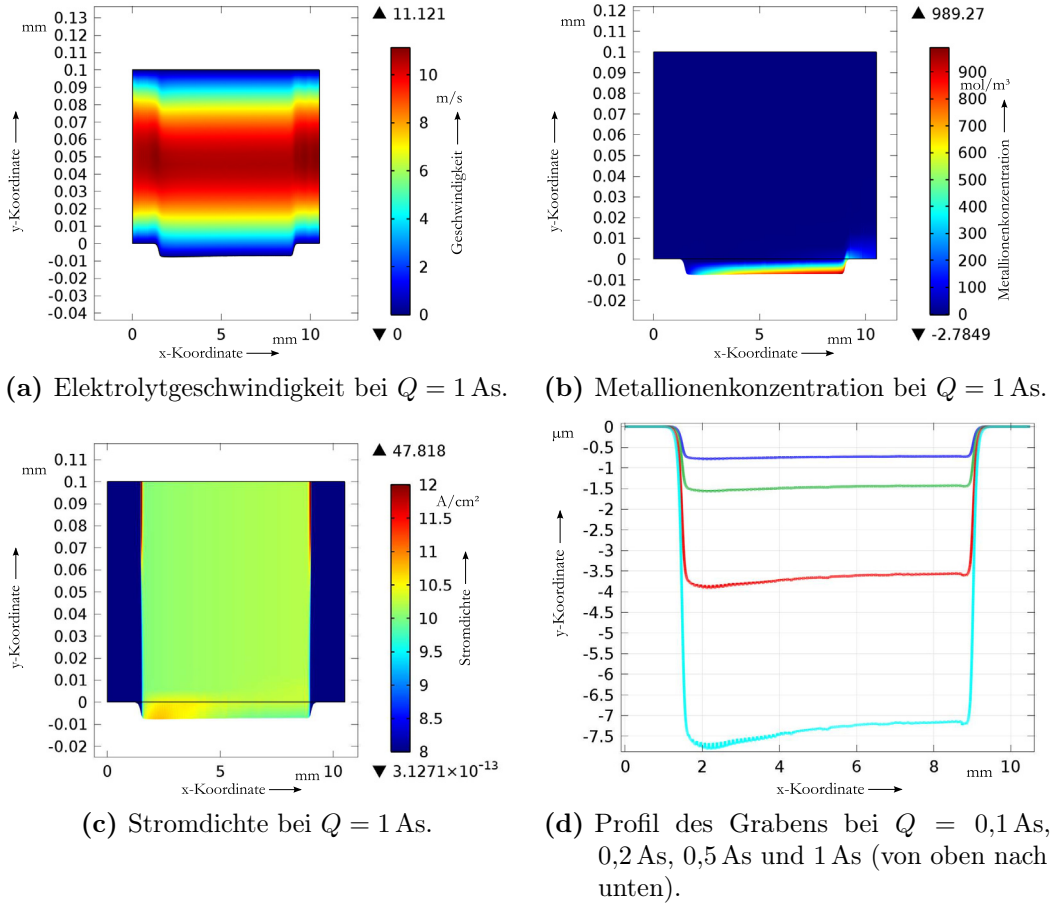


Abbildung 2.6. Simulationsergebnis Strukturprofil. Kanalhöhe $h_{Kanal} = 100 \mu\text{m}$, Stromdichte $J = 10 \text{ A/cm}^2$, Druck $p_{in} = 1,0 \text{ bar}$.

schwindigkeit auf über $3,7 \text{ m/s}$ steigt (Abbildung 2.5a). Sie ist damit etwa vier mal so hoch wie in Abbildung 2.4a. Die Konzentration der Metallionen hingegen ist mit maximal 1205 mol/m^3 wesentlich geringer. Die Ursache dafür ist in Abbildung 2.5c zu sehen. Zwar nimmt die Stromdichte im Verlaufe des Kanals insgesamt zu, jedoch tritt direkt an der Werkstückoberfläche lokal eine Abschwächung der Stromdichte auf. Die gelösten Metallionen sind wie das Werkstück positiv geladen. Aus Sicht des Werkstücks tritt daher eine Abschirmung der Gegenelektrode auf, bis die Leitfähigkeit des Elektrolyten so weit zugenommen hat, dass die Leitfähigkeitserhöhung der Abschirmung entgegenwirken kann. Im ersten Drittel der Gegenelektrode dominiert die zunehmende Abschirmung der Gegenelektrode das Strukturergebnis, bis ab $x = 4 \text{ mm}$ die Leitfähigkeit und damit die Stromdichte so weit zunimmt, dass sich beide Effekte die Waage halten und die Strukturtiefe konstant bleibt (Abbildung 2.5d).

In Abbildung 2.6 wurde die Kanalhöhe auf $100 \mu\text{m}$ erhöht. Hier liegt die maximale

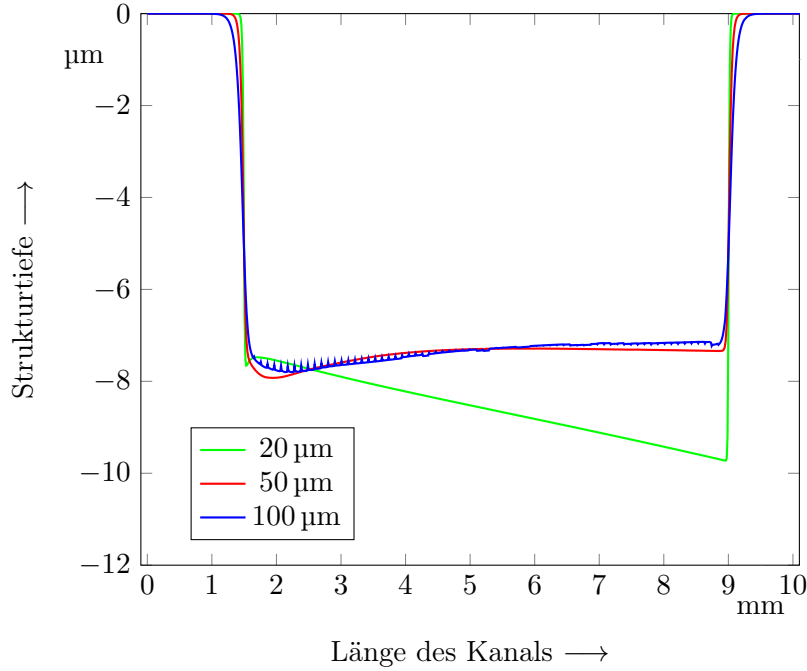


Abbildung 2.7. Strukturprofile aus den Abbildungen 2.4 bis 2.6, abhängig von der Kanalhöhe, im direkten Vergleich.

Ionenkonzentration mit knapp 990 mol/m^3 unter der Konzentration des $50 \mu\text{m}$ hohen Kanals. Damit steigt der abschirmende Effekt weiter, sodass die Strukturtiefe im Laufe des Kanals abnimmt.

Um zu bestimmen, wann welcher der beiden Einflüssen überwiegt, werden für einen Differenzdruck von $1,0 \text{ bar}$ die maximale Metallionenkonzentration $c_{Fe,max}$ im Kanal sowie die Strukturtiefe am Anfang und am Ende der Gegenelektrode den Simulationsergebnissen entnommen (siehe Anhang, Abschnitt A.3.1). Die Ergebnisse für $c_{Fe,max}$ sind in Tabelle 2.2 dargestellt.

Die beiden Strukturturen am Anfang und am Ende des Grabens werden durcheinander dividiert, sodass man den Strukturfaktor

$$F_S = \frac{\text{Strukturtiefe Ende}}{\text{Strukturtiefe Anfang}} \quad (2.9)$$

erhält (Tabelle 2.3). Werte von $F_S > 1$ bedeuten, dass die Struktur am Ende tiefer als am Anfang ist (überwiegend Leitfähigkeitserhöhung), Werte von $F_S < 1$ bedeuten, dass die Struktur am Ende flacher ist (überwiegend Abschirmung der Gegenelektrode). Bei $F_S = 1$ gleichen sich beide Effekte aus. Im Sinne einer homogenen Strukturtiefe sind Werte mit $F_S \approx 1$ vorteilhaft. Wie im kommenden Abschnitt (Abschnitt 2.1.5.2) jedoch zu sehen sein wird, lässt sich mit einer niedrigeren Kanalhöhe eine höhere laterale Auflösung erreichen. Zudem sinkt die Oberflächenrauheit mit steigender Stromdichte.

Es kann beobachtet werden, dass insbesondere bei flachen Kanälen ($10 \mu\text{m}$ und $20 \mu\text{m}$

2. Modellierung

Tabelle 2.2. Metallionenkonzentration $c_{Fe,max}$.

Kanalhöhe	Stromdichte			
	1 A/cm ²	2 A/cm ²	5 A/cm ²	10 A/cm ²
10 µm	308	722	2962	9521*
20 µm	175	362	975	2120
50 µm	121	243	617	1206
100 µm	99	202	507	989

*Interpolierter Wert, da für diesen Parameter keine Lösung bestimmt werden konnte.

Tabelle 2.3. Strukturfaktor F_S .

Kanalhöhe	Stromdichte			
	1 A/cm ²	2 A/cm ²	5 A/cm ²	10 A/cm ²
10 µm	1,27	1,63	2,88	4,89*
20 µm	1,04	1,07	1,18	1,36
50 µm	1,01	0,97	0,96	0,91
100 µm	1,00	1,00	0,97	0,94

*Interpolierter Wert, da für diesen Parameter keine Lösung bestimmt werden konnte.

Höhe) besonders viele Metallionen gelöst werden und der Tiefenunterschied zwischen Anfang und Ende der Strukturen besonders groß ausfällt.

Um die Werte miteinander vergleichbar und Voraussagen über das Prozessverhalten machen zu können, werden zwei Faktoren K_c und K_f eingeführt. K_c berechnet sich zu

$$K_c = \frac{c_{Fe,max} \cdot h_{Kanal}}{J} \quad , \quad (2.10)$$

während

$$K_f = F_S \cdot h_{Kanal} \quad (2.11)$$

ist. K_c stellt die Lösungsrate der Metallionen dar und ist gewissermaßen proportional zum Kehrwert des elektrischen Feldes, da $c_{Fe,max}$ proportional zur Leitfähigkeit des Elektrolyten und damit zu $1/R$ ist. J ist proportional zum elektrischen Strom I , sodass nach dem Ohmschen Gesetz

$$K_c = \frac{c_{Fe,max}}{J} \cdot h_{Kanal} \sim \frac{1}{U} \cdot h_{Kanal} \sim \frac{1}{E} \quad (2.12)$$

folgt.

Die graphische Darstellung von K_c und K_f in Abhängigkeit von der Kanalhöhe (Abbildungen 2.8 und 2.9) zeigt für beide Graphen qualitativ zunächst einen ähnlichen Verlauf. Mit Ausnahme der Werte für 10 µm Kanalhöhe verlaufen die Werte fast linear und sind

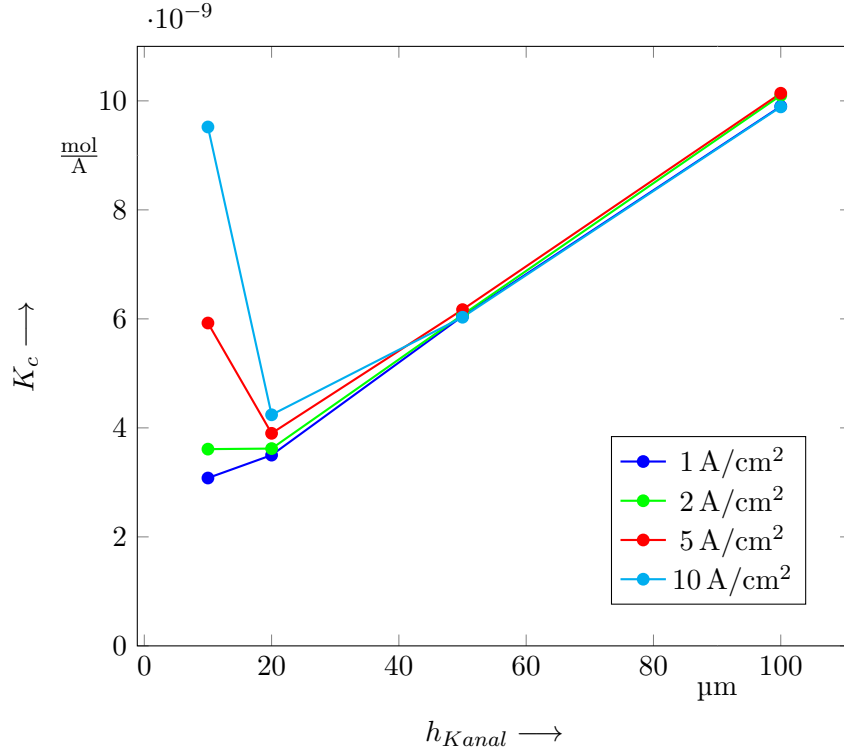


Abbildung 2.8. Lösungsrate der Metallionen K_c in Abhängigkeit von der Kanalhöhe.

zugleich nahezu unabhängig von der Stromdichte. Damit wird deutlich, dass das Strukturprofil von der Lösungsrate der Metallionen abhängt. Gleichzeitig ist es aber aufgrund der Beziehung 2.12 umgekehrt proportional zum elektrischen Feld. Im Bereich steigender Werte für K_c und K_F (Kanalhöhe größer als $20 \mu\text{m}$) zeigt dies die Helmholtz'sche Doppelschicht, für sinkende Werte (Kanalhöhe kleiner als $20 \mu\text{m}$) überwiegt der Einfluss durch die Leitfähigkeitserhöhung. Noch deutlicher wird dieser Zusammenhang, wenn man den Quotienten von K_c und K_F

$$K_{cF} = \frac{K_c}{K_F} = \frac{c_{Fe,max}}{F_S \cdot J} \quad (2.13)$$

in Abhängigkeit von J betrachtet. In Abbildung 2.10 wird deutlich, welchen Einfluss die einzelnen Parameter haben. Die $10 \mu\text{m}$ -Kurve ist konvex und fällt stetig. Die Kurven für $50 \mu\text{m}$ und $100 \mu\text{m}$ hingegen sind konkav und steigen stetig. Sinkende Werte sind also ein Hinweis auf einen hohen Einfluss der Metallionen auf die Leitfähigkeit und damit einhergehend einer geringen Abschirmwirkung. Steigende Werte hingegen zeigen eine zunehmende Abschirmung der Gegenelektrode an. Interessant ist das Verhalten der $20 \mu\text{m}$ -Linie, denn sie liegt im Übergangsbereich beider Einflüsse. Von 1 A/cm^2 auf 2 A/cm^2 steigt die Kurve, sodass zunächst der abschirmende Einfluss überwiegt. Bei höheren Stromdichten jedoch überwiegt dann die Erhöhung der Leitfähigkeit.

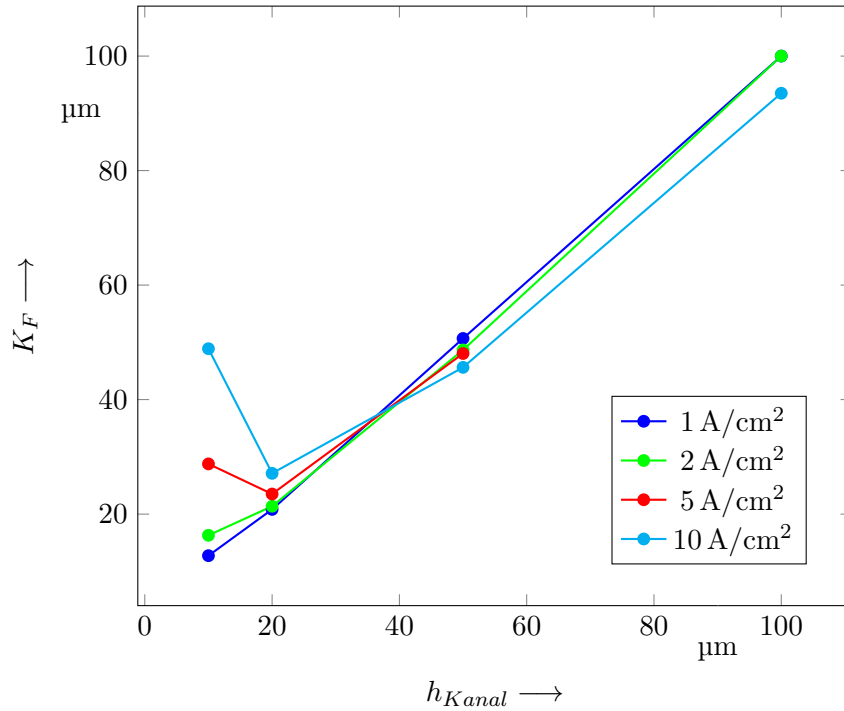


Abbildung 2.9. $K_F = F_S \cdot h_{Kanal}$ in Abhängigkeit von der Kanalhöhe.

2.1.5.2. Strukturauflösung

Um den Einfluss der Kanalhöhe auf die Strukturauflösung zu untersuchen, werden die gleichen Parameter wie im vorherigen Abschnitt 2.1.5.1 betrachtet. Allerdings ist nun die Gegenelektrode strukturiert. Die leitfähige Gesamtlänge ist mit 7,0 mm Länge 0,5 mm kürzer als zuvor, wird jedoch durch 75 μm breite, isolierende Stege unterbrochen, welche 1 mm auseinander liegen. Dadurch wird erreicht, dass nahezu die gleiche Menge Metallionen wie bei den Berechnungen mit unstrukturierter Gegenelektrode generiert wird und die Gesamtlänge der Gegenelektrode mit 7,45 mm inklusive der Unterbrechungen ebenfalls nahezu identisch ist.

In den Abbildungen 2.11 bis 2.13 ist erkennbar, wie die isolierten Stege der Gegenelektrode auf das Werkstück übertragen werden. Abbildung 2.14 zeigt die Kanalprofile abhängig von der Kanalhöhe im Vergleich. Die Werte für die Strömungsgeschwindigkeit, die Ionenkonzentration und Stromdichte liegen geringfügig unter den Ergebnissen aus den Abbildungen 2.4 bis 2.6. Auch die Strukturprofile auf dem Grund des Grabens sind nahezu identisch, sodass auch hier die Effekte der Abschirmung und der Leitfähigkeitserhöhung durch die gelösten Metallionen im gleichen Maße zum Tragen kommen.

Es wird jedoch deutlich, wie sich die Kanalhöhe und damit die Verteilung des elektrischen Feldes auf die Strukturauflösung auswirken. Während bei 20 μm Kanalhöhe die 75 μm breiten Stege mit 95 % der Strukturtiefe nahezu ohne Höhenverlust übertragen werden (Abbildung 2.11), beträgt bei 50 μm Kanalhöhe die Höhe der Stege nur noch 45 % der

2. Modellierung

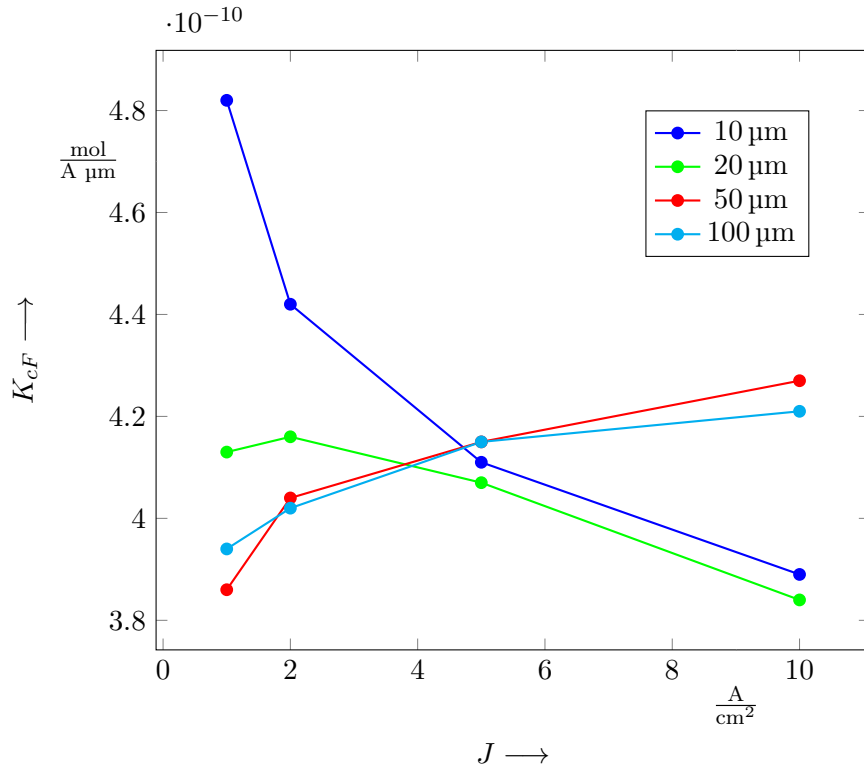


Abbildung 2.10. $K_{cF} = K_c/K_F$ in Abhängigkeit von der Kanalhöhe.

Maximaltiefe (Abbildung 2.12). Ist der fluidische Kanal 100 μm hoch, sinkt die Höhe der Stege weiter auf nur noch 15 % der Maximaltiefe (Abbildung 2.13).

Aus dem Ergebnis aus Abbildung 2.11 kann ein weiterer Effekt der zunehmenden Metallionenkonzentration auf das Auflösungsvermögen des Prozesses gewonnen werden. Die Höhe des ersten Steges (links) liegt 0,73 μm unterhalb der ursprünglichen Werkstückoberfläche. Die absolute Höhe der einzelnen Stege nimmt bis zum letzten Steg ganz rechts kontinuierlich zu, sodass dessen Spitze nur noch 0,59 μm unterhalb der anfänglichen Werkstückoberfläche liegt. Gleichzeitig sinkt jedoch die Tiefe der Struktur am Boden von 8 μm am Anfang bis auf 10,2 μm am Ende des Kanals. Die Strukturauflösung nimmt also mit zunehmender Metallionenkonzentration zu. Durch die zunehmende Leitfähigkeit wird auch das elektrische Feld stärker fokussiert und streut damit weniger.

2. Modellierung

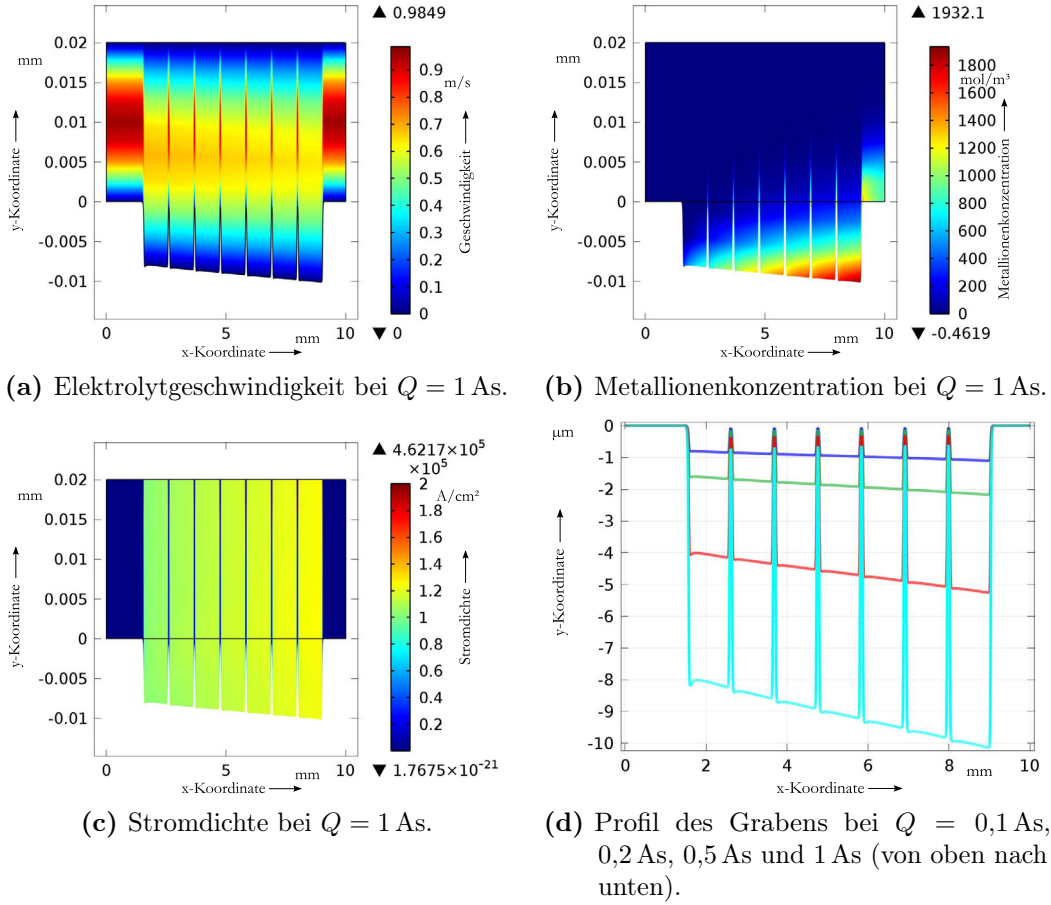


Abbildung 2.11. Simulationsergebnis Strukturauflösung. Kanalhöhe $h_{Kanal} = 20 \mu\text{m}$, Stromdichte $J = 10 \text{ A/cm}^2$, Druck $p_{in} = 1,0 \text{ bar}$.

2. Modellierung

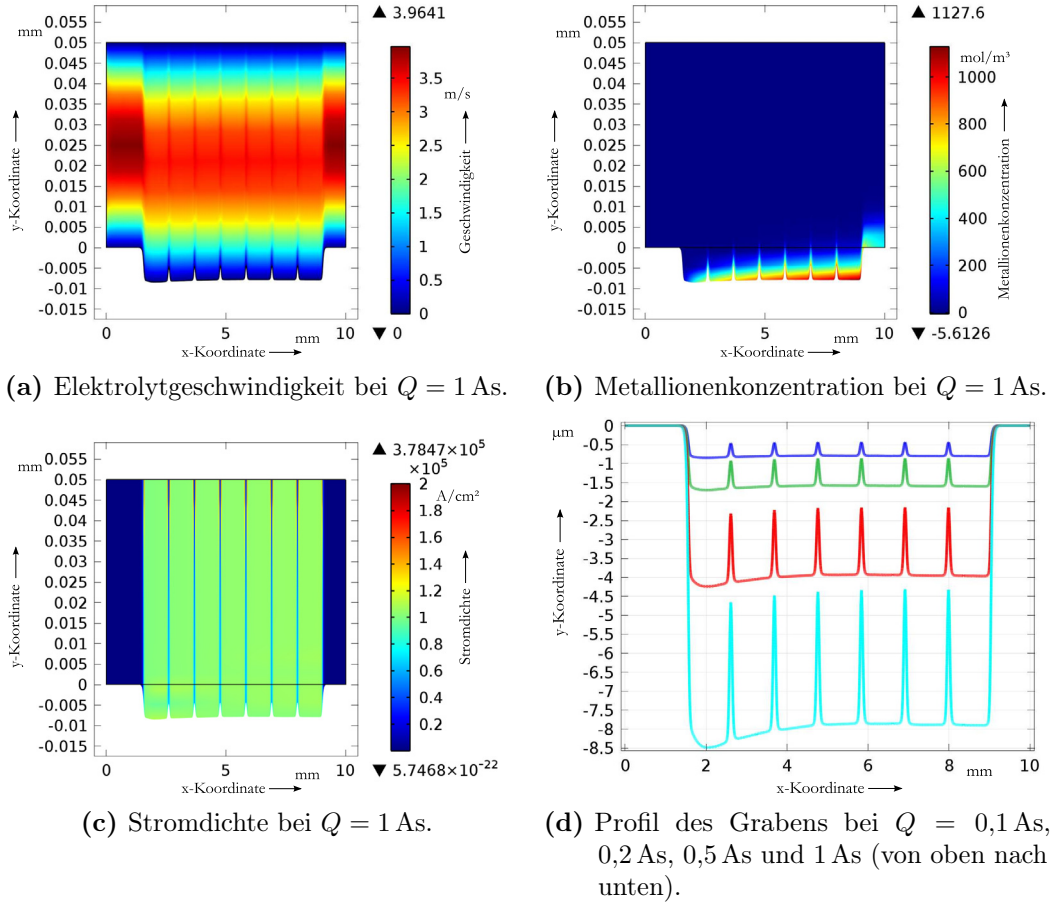


Abbildung 2.12. Simulationsergebnis Strukturauflösung. Kanalhöhe $h_{Kanal} = 50 \mu\text{m}$, Stromdichte $J = 10 \text{ A/cm}^2$, Druck $p_{in} = 1,0 \text{ bar}$.

2. Modellierung

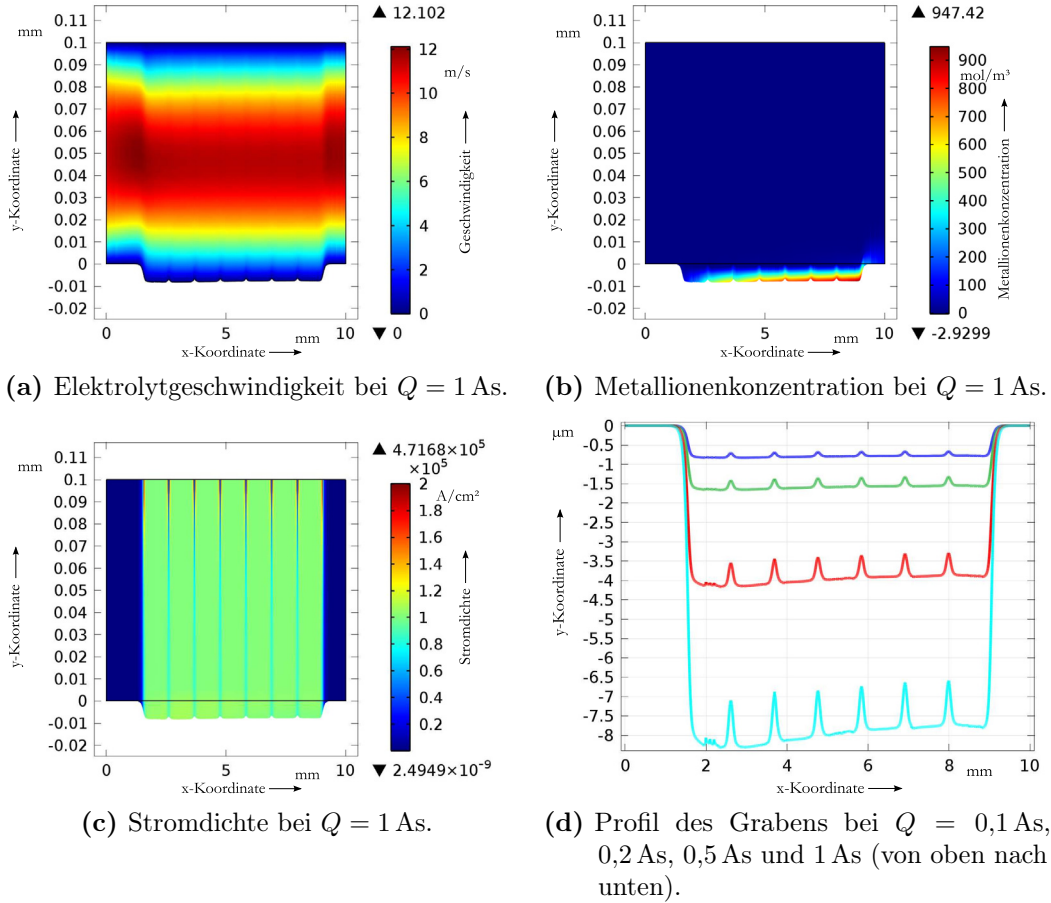


Abbildung 2.13. Simulationsergebnis Strukturauflösung. Kanalhöhe $h_{Kanal} = 100 \mu\text{m}$, Stromdichte $J = 10 \text{ A/cm}^2$, Druck $p_{in} = 1,0 \text{ bar}$.

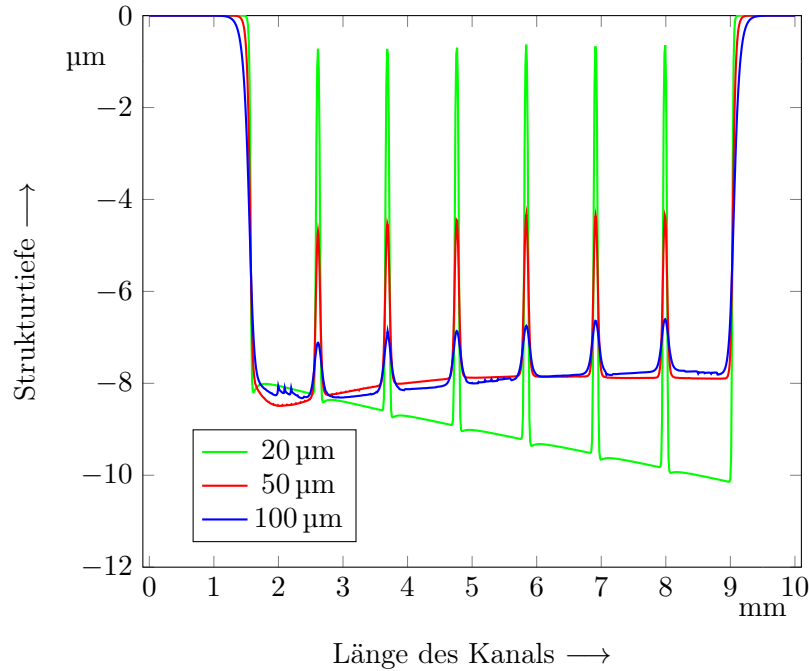


Abbildung 2.14. Strukturprofile aus den Abbildungen 2.11 bis 2.13, abhängig von der Kanalhöhe, im direkten Vergleich.

2.2. Analytisches Modell

Ein analytisches Modell zur Untersuchung des Einflusses der gelösten Metallionen auf das Strukturprofil wird in diesem Abschnitt entwickelt. Während im Kapitel 2.1 nach Möglichkeit alle Einflussparameter in die FEM-Simulation aufgenommen wurden, werden nun einige Vereinfachungen vorgenommen. Dennoch soll mit dem Modell in einem gewissen Parameterrahmen eine zuverlässige Vorhersage des Strukturprofils möglich sein.

Abbildung 2.15 zeigt, wie das Modell vereinfacht wird (vgl. mit Abbildung 2.1 auf Seite 27). Weil der Gesamtstrom während der Prozessierung konstant gehalten wird, fällt der Schritt über die Berechnung der lokalen Stromdichte weg. Einzig die Konzentration der Metallionen ist ein Maß für die Abtragsrate, sodass die Berechnung der Leitfähigkeit und des elektrochemischen Abtrages nicht notwendig sind. Dies bedingt, dass das Modell die Abschirmung der Gegenelektrode durch die Helmholtz'sche Doppelschicht nicht berücksichtigen kann und damit nur für Metallionenkonzentration von über 1000 mol/m^3 und damit einhergehend hohen Stromdichten und flachen Kanälen Gültigkeit besitzt. Außerdem wird die Änderung der Kanalhöhe durch den Materialabtrag vernachlässigt. Somit erfolgt keine Rückkopplung, welche eine iterative, zeitabhängige Berechnung notwendig machen würde. Während die FEM-Simulation zweidimensional ist, berücksichtigt das analytische Modell jedoch eine Veränderung der Kanalbreite, um darüber die Ätztiefe beeinflussen zu können.

Grundlage für das Modell ist eine Parallelschaltung von Widerständen (Abbildung

2. Modellierung

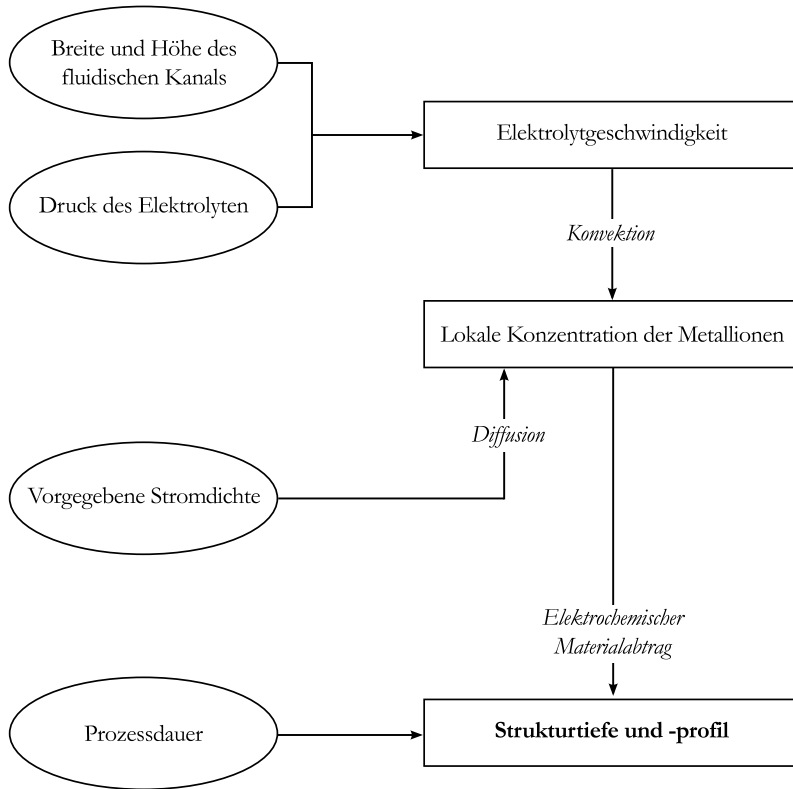


Abbildung 2.15. Reduzierung der Einflussparameter. Abbildung 2.1 auf Seite 27 zeigt im Vergleich dazu das vollständige Modell.

2.16). Der Kanal wird in n_{Raster} Streifen zerlegt. Da der Strom von Anode zu Kathode durch die Stromquelle konstant gehalten wird, kann nur eine Änderung des elektrischen Widerstandes durch gelöste Metallionen in einem Streifen eine lokale Änderung des Stromes und damit der Stromdichte in diesem Streifen bewirken.

Das Modell ist so aufgebaut, dass zunächst die maximale Fluidgeschwindigkeit des Elektrolyten am Scheitelpunkt des parabolischen Strömungsprofils in Abhängigkeit von der x -Koordinate berechnet wird. Der Elektrolyt fließt von links nach rechts. Anschließend wird der Weg eines gelösten Ions vom linken Ende der Anode zur Kathode unter Einfluss von Diffusion und Konvektion bestimmt. Dieser Weg wird in einzelne Schritte unterteilt. Anschließend wird die gesamte Länge der Gegenelektrode in einzelne Schritte unterteilt und die Berechnung wiederholt, sodass der fluidische Kanal virtuell mit Ionen gefüllt wird. Zur Bestimmung der Ionendichte wird der Kanal abschließend in n_{Raster} senkrechte Streifen unterteilt (siehe Abbildung 2.16) und die Ionen in jedem dieser Streifen gezählt. Die Anzahl der Ionen wird auf die Anzahl von Ionen in dem Streifen mit den meisten Ionen normiert, um das Ergebnis unabhängig von den Schritt- und Rastergrößen zu machen. Die entstehende Kurve der Ionenverteilung ist dann das Maß für die Abtragsrate und damit die Form des Strukturprofils.

Zum besseren Verständnis der Funktionsweise des Modells wird im Abschnitt 2.2.1 die

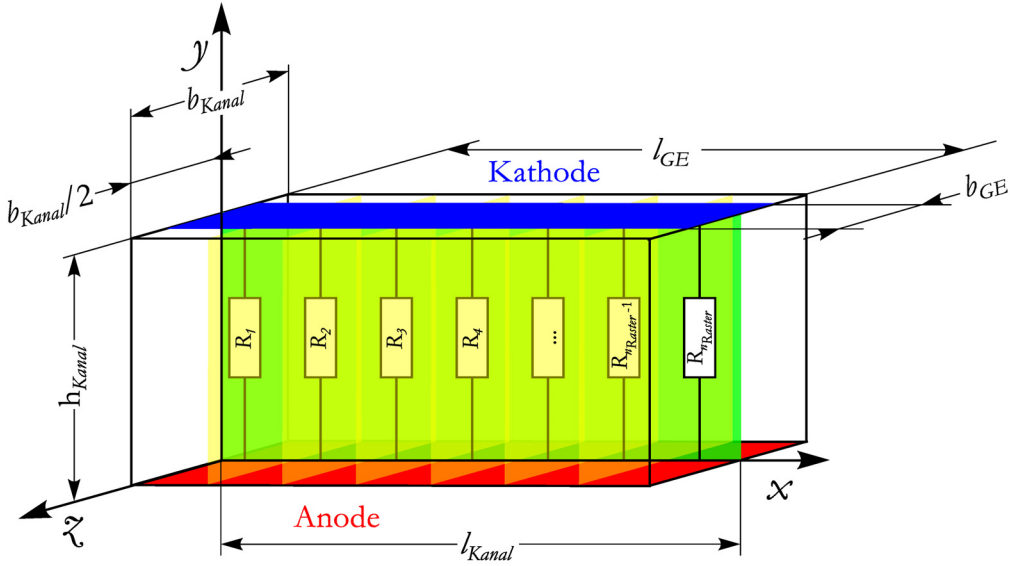


Abbildung 2.16. Zerlegung des Kanals in einzelne Streifen.

Geschwindigkeitsverteilung in einem Rohr mit kreisförmigem Querschnitt hergeleitet. Dafür gilt das Gesetz von Hagen-Poiseuille. Verwendet wird anschließend jedoch eine Näherungsformel für rechteckige Querschnitte, weil auch die später verwendeten fluidischen Kanäle rechteckige Querschnitte haben.

Mit den entsprechenden Geschwindigkeitskomponenten durch die fluidische Strömung und das elektrische Feld (Konvektion und Diffusion) wird anschließend die Ionenbewegung im Kanal beschrieben (Abschnitt 2.2.2).

Die Berechnung der Ionenverteilung geschieht in Abschnitt 2.2.3.

Das Modell wird mit *GNU Octave*, einer interpretierten Programmiersprache für numerische Berechnungen (kompatibel zu *MATLAB*), umgesetzt. Die Ergebnisse werden in Abschnitt 2.2.4 vorgestellt. Der Quellcode befindet sich im Anhang in Abschnitt A.2.1.

2.2.1. Geschwindigkeitskomponenten

Ein gelöstes Ion im Strömungskanal steht unter dem Einfluss zweier Kräfte: Einerseits durch den strömenden Elektrolyten, andererseits durch die Kraft durch das elektrische Feld zwischen Werkstück und Gegenelektrode.

Bei der Strömung im Kanal handelt es sich um eine stationäre, laminare Strömung. In Rohren mit kreisförmigem Querschnitt gilt gemäß Abbildung 2.17 für einen Strömungszyylinder

$$\sum F_{ix} = 0 = (p_1 - p_2) \pi r^2 - \tau \cdot 2\pi r l \quad (2.14)$$

mit

$$\tau = -\eta \cdot \frac{dv}{dr} \quad (2.15)$$

Dieser Strömungszyylinder bewegt sich mit konstanter Geschwindigkeit, daher ist die Summe der Kräfte Null. $p_1 - p_2 = \Delta p_v$ ist die Druckdifferenz, die auf die Stirnflächen

2. Modellierung

(πr^2) des Zylinders wirkt. Der Term $\tau \cdot 2\pi r l$ beschreibt die Schubspannungen, die an der Außenfläche des Zylinders wirken. τ ist wiederum abhängig von der dynamischen Viskosität η des Fluides. Die Schubspannungen nehmen linear zum Rand hin zu:

$$\tau(r) = -\eta \cdot \frac{dv}{dr} = \frac{\Delta p_v r}{2l} \quad . \quad (2.16)$$

An der Wand des Rohres gilt die Haftungsbedingung

$$v(r = d/2) = 0 \quad . \quad (2.17)$$

Das Ergebnis der Integration von Gleichung 2.16 ist eine parabolische Geschwindigkeitsverteilung im Rohr:

$$v(r) = \int \frac{\Delta p_v r}{-2l\eta} \cdot dr \quad (2.18)$$

$$= \frac{d^2}{(4 - r^2) 4\eta} \frac{\Delta p_v}{l} \quad . \quad (2.19)$$

Durch weitere Integration folgt für den Volumenstrom das Gesetz von Hagen-Poiseuille:

$$\dot{V} = \int_{r=0}^{d/2} v(r) 2\pi r dr = \frac{\pi d^4}{128\eta} \frac{\Delta p_v}{l} \quad . \quad (2.20)$$

Die mittlere Strömungsgeschwindigkeit beträgt

$$v = \frac{\dot{V}}{A} = \frac{\pi d^4}{128\eta} \frac{\Delta p_v}{l} \cdot \frac{4}{\pi \cdot d^2} = \frac{d^2}{32\eta} \frac{\Delta p_v}{l} \quad . \quad (2.21)$$

In der Mitte des Kanals ($r = 0$ bei kreisförmigem Querschnitt) ist die Geschwindigkeit maximal und es folgt nach Gleichung 2.19

$$v(r = 0) = v_{max} = \frac{d^2}{16\eta} \frac{\Delta p_v}{l} \quad . \quad (2.22)$$

Die maximale Geschwindigkeit ist also doppelt so groß wie die mittlere Geschwindigkeit.

Hartnett und Kostic haben für verschiedene Rohrquerschnittsformen Näherungsformeln hergeleitet [88]. Da die verwendeten Kanäle einen rechteckigen Querschnitt der Breite b_{Kanal} , Höhe h_{Kanal} und Länge l_{Kanal} haben, wird der Volumenstrom folgendermaßen angegeben:

$$\dot{V}_1 = \frac{K \cdot \min(b_{Kanal}, h_{Kanal})^3 \cdot \max(b_{Kanal}, h_{Kanal})}{12\eta} \frac{\Delta p}{l_{Kanal}} \quad (2.23)$$

mit

$$K = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^5} \frac{192}{\pi^5} \frac{\min(b_{Kanal}, h_{Kanal})}{\max(b_{Kanal}, h_{Kanal})} \cdot \tanh\left((2n-1) \frac{\pi \max(b_{Kanal}, h_{Kanal})}{2 \min(b_{Kanal}, h_{Kanal})}\right) \quad . \quad (2.24)$$

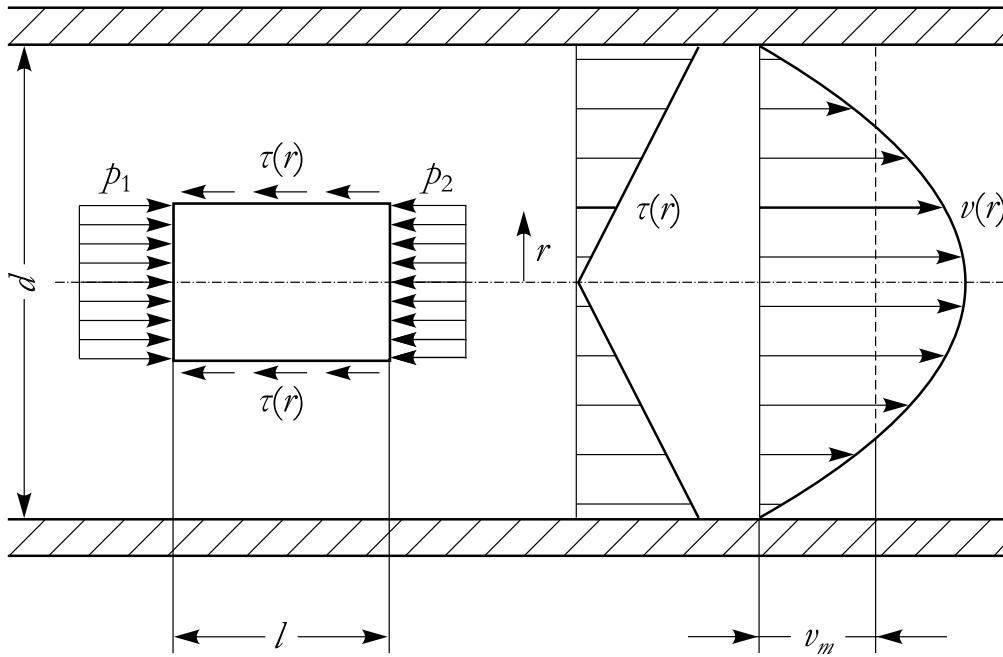


Abbildung 2.17. Laminare Strömung in einem Rohr mit kreisförmigem Querschnitt. [52].

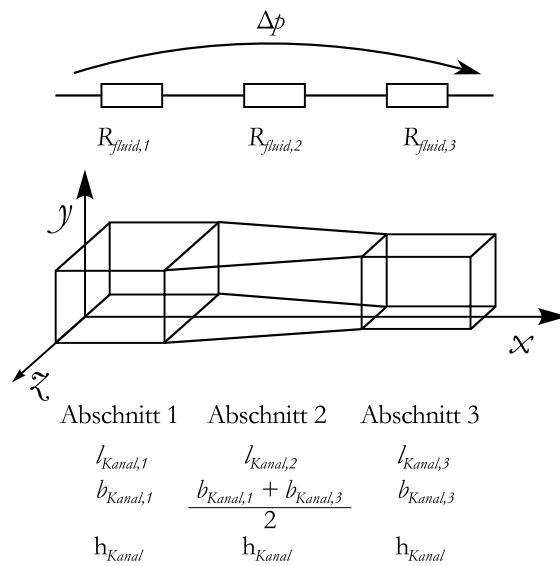


Abbildung 2.18. Analogie zwischen fluidischem und elektrischem Widerstand.

2. Modellierung

In mikrofluidischen Systemen sind die Kanäle oftmals sehr flach und breit ($h_{Kanal}/b_{Kanal} \ll 1/10$), sodass praktisch mit $K = 1$ gerechnet werden kann [89].

Die mittlere Strömungsgeschwindigkeit folgt wiederum durch Division des Volumenstroms durch den Kanalquerschnitt. Bei veränderlichem Kanalquerschnitt, beispielsweise durch eine Verengung des Kanals, kann eine Analogie zum elektrischen Strom herangezogen werden. Dabei entspricht das Druckgefälle (Δp) der elektrischen Spannung (U) und der Volumenstrom (\dot{V}) dem elektrischen Strom (I). Analog zum Ohmschen Gesetz ($U = R \cdot I$) ist der fluidische Widerstand des Kanals nach Formel 2.23

$$R_{fluid} = \frac{12\eta \cdot l_{Kanal}}{h_{Kanal}^3 \cdot b_{Kanal}} \quad . \quad (2.25)$$

Entsprechend einer elektrischen Reihenschaltung ist der fluidische Widerstand einer Gesamtstrecke die Summe der fluidischen Widerstände der Einzelstrecken (siehe Abbildung 2.18). Dabei sind die entsprechenden geometrischen Parameter der Einzelstrecken zu verwenden. Für den in Abbildung 2.18 gezeigten Kanal ergibt sich demnach

$$R_{fluid} = R_{fluid,1} + R_{fluid,2} + R_{fluid,3} \quad (2.26)$$

mit

$$R_{fluid,1} = \frac{12\eta \cdot l_{Kanal,1}}{h_{Kanal}^3 \cdot b_{Kanal,1}} \quad , \quad (2.27)$$

$$R_{fluid,2} = \frac{12\eta \cdot l_{Kanal,2}}{h_{Kanal}^3 \cdot (b_{Kanal,1} + b_{Kanal,3})/2} \quad \text{und} \quad (2.28)$$

$$R_{fluid,3} = \frac{12\eta \cdot l_{Kanal,3}}{h_{Kanal}^3 \cdot b_{Kanal,3}} \quad . \quad (2.29)$$

Aufgrund des Massenerhaltungssatzes beträgt die Geschwindigkeit in der Mitte des Kanals ($y = h_{Kanal}/2$) an der Stelle x

$$v_{1,max}(x) = 2 \cdot \frac{\Delta p}{R_{fluid}} \cdot \frac{1}{b_{Kanal}(x) \cdot h_{Kanal}(x)} \quad . \quad (2.30)$$

Diese Formel wird im Modell verwendet, um die maximale Geschwindigkeit eines Ions in der Mitte des Kanals zu bestimmen.

Die Wanderungsgeschwindigkeit der Ionen von der Anode zur Kathode, also die y -Komponente der Bewegung, ist proportional zur elektrischen Feldstärke E und abhängig von der Ionenbeweglichkeit μ :

$$v_y = \mu E = \mu \frac{U_{Kanal}}{h_{Kanal}} \quad . \quad (2.31)$$

Sie ist über die gesamte Strecke von der Anode zur Kathode konstant.

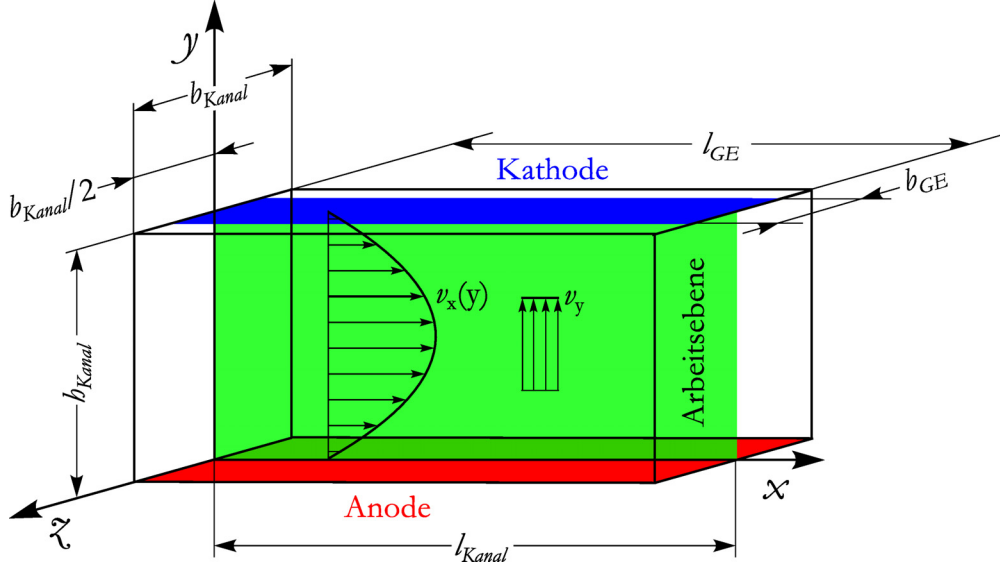


Abbildung 2.19. Schematische Darstellung des Kanals mit den Geschwindigkeitskomponenten eines Ions und der Festlegung des Koordinatensystems.

2.2.2. Ionenbewegung im Kanal

Wie bei dem FEM-Modell wird für die folgenden Rechnungen die dreidimensionale Aufgabenstellung auf ein zweidimensionales Problem reduziert ($z = 0$). In Abbildung 2.19 ist die relevante Ebene mit den ausschlaggebenden Geschwindigkeitskomponenten dargestellt.

Der Kanal hat wie beim FEM-Modell die Höhe h_{Kanal} , Breite b_{Kanal} und Länge l_{Kanal} . Das Koordinatensystem wird so gewählt, dass die x -Achse mittig durch den Kanal läuft. Ihr Nullpunkt wird jedoch nicht auf den Kanalanschluss, sondern auf den Anfang der Gegenelektrode gelegt. Der Nullpunkt der y -Achse liegt auf der Werkstückoberfläche. Die z -Achse komplettiert das kartesische Koordinatensystem.

Für die Auszählung der Ionen im Kanal werden, je nach gewünschter Ortsauflösung, zahlreiche Koordinatenpaare $n_{Koord.}$ des Pfades, auf dem sich ein Ion von der Anode zur Kathode bewegt, benötigt. Zunächst wird die für den Weg erforderliche Zeit berechnet

$$t_{max} = \frac{h_{Kanal}}{v_y} = \frac{h_{Kanal}^2}{\mu \cdot U_{Kanal}} \quad . \quad (2.32)$$

Ein Zeitschritt $t_{Schritt}$ entspricht demnach

$$t_{Schritt} = \frac{t_{max}}{n_{Koord.}} \quad . \quad (2.33)$$

Ein gelöstes Ion hat zwei Geschwindigkeitskomponenten. In Richtung der Kathode bewegt es sich mit der Geschwindigkeit v_y fort, in Längsrichtung des Kanals mit der Geschwindigkeit $v_x(y)$. v_y wird nach Formel 2.31 berechnet und ist konstant. Damit gilt

für die y -Koordinate der Bewegung

$$y(i = 1..n_{Koord.}) = \mu \frac{U}{h_{Kanal}} \cdot t_{Schritt} + y(i - 1) \quad . \quad (2.34)$$

In x -Richtung ist das Geschwindigkeitsprofil parabelförmig. Die maximale Geschwindigkeit am Scheitelpunkt $v_{x,max}$ ist gleich $v_{1,max}$ aus Gleichung 2.30. Weil durch das parabelförmige Strömungsprofil die Geschwindigkeit ortsabhängig ist, folgt für die Ortskoordinaten eines Pfades

$$x(i = 1..n_{Koord.}) = \left(-4 \cdot \frac{v_{x,max}}{h_{Kanal}^2} \left(y(i) - \frac{h_{Kanal}}{2} \right)^2 + v_{x,max} \right) \cdot t_{Schritt} + x(i - 1) \quad . \quad (2.35)$$

Da nicht nur ein einzelnes Ion bei $x = 0$, sondern über die gesamte leitfähige Fläche der Gegenelektrode Ionen gelöst werden, werden über einen zusätzlichen Term weitere m_{Pfade} Pfadlinien berechnet. Diese sind äquidistant über die Länge des Kanals verteilt.

$$x(i, j = 1..m_{Pfade}) = \left(-4 \cdot \frac{v_{x,max}}{h_{Kanal}^2} \left(y(i) - \frac{h_{Kanal}}{2} \right)^2 + v_{x,max} \right) \cdot t_{Schritt} + x(i - 1) + \left(\frac{l_{Kanal}}{n_{Koord.}} \right) \cdot (j - 1) \quad . \quad (2.36)$$

Abbildung 2.20 zeigt den Weg der Ionen in einem Kanal. Sie bewegen sich entlang eines S-förmigen Pfades, ausgelöst durch das parabelförmige Strömungsprofil, von der Anode zur Kathode.

2.2.3. Auszählung der Ionen

Wurde der fluidischen Kanal wie im vorhergehenden Abschnitt virtuell mit Ionen gefüllt, können diese nun ausgezählt werden. Dadurch entsteht eine Darstellung der Häufigkeit, mit der sich einzelne Ionen an einer bestimmten Stelle im Kanal aufhalten.

Zur Visualisierung der Ionendichte wird der Kanal durch ein rechteckiges Raster in einzelne Zählsegmente aufgeteilt (Abbildung 2.21). Es ist bei der Wahl der Rastergröße darauf zu achten, dass pro Segment hinreichend viele Ionen gezählt werden, um eine akzeptable Ortsauflösung zu erreichen. Ein sehr feinmaschiges Raster hingegen erhöht massiv die Rechenzeit, sodass hier ein Kompromiss gefunden werden muss. In der Praxis hat sich ein Faktor $k_{Raster} = n_{Koord.}/n_{Raster}$ von 2 bis 10 als praktikabel herausgestellt.

In jedem der Rastersegmente werden nun die einzelnen Punkte gezählt und dargestellt. Dazu wird in jedem Segment ausgewertet, ob der x -Wert eines Koordinatenpaares größer oder gleich der unteren und kleiner als die obere Segmentgrenze ist. Mit dem y -Wert wird analog verfahren. In einer Matrix, deren einzelne Elemente den Segmenten entsprechen, werden die Ergebnisse gespeichert. Aus diesen Daten lässt sich eine Grafik erstellen, welche die relative Verteilung der Metallionen veranschaulicht (Abbildung 2.22). Die Darstellung wird auf Eins normiert, um sie unabhängig von der gewählten Rastergröße und der Anzahl Koordinatenpaare und damit vergleichbar zu machen.

2. Modellierung

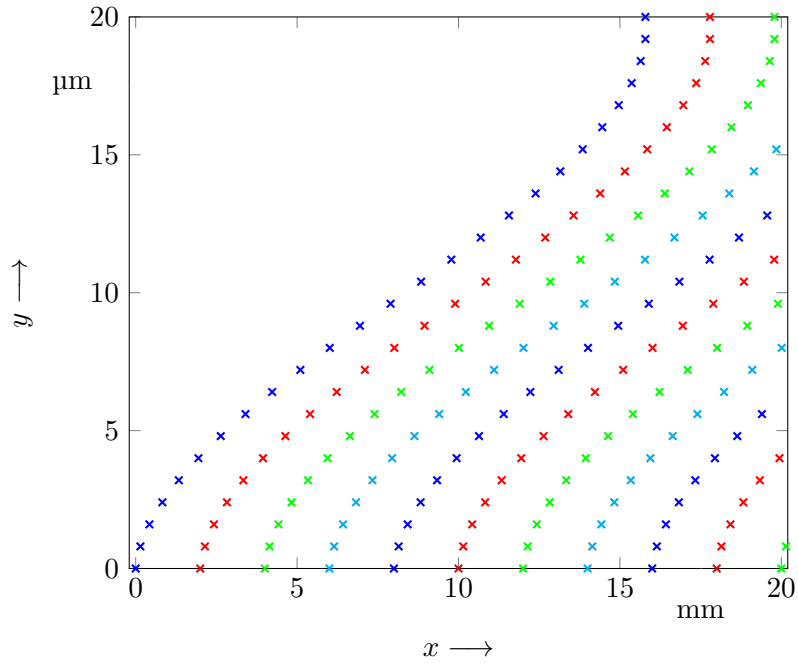


Abbildung 2.20. Weg der Ionen durch den Kanal.

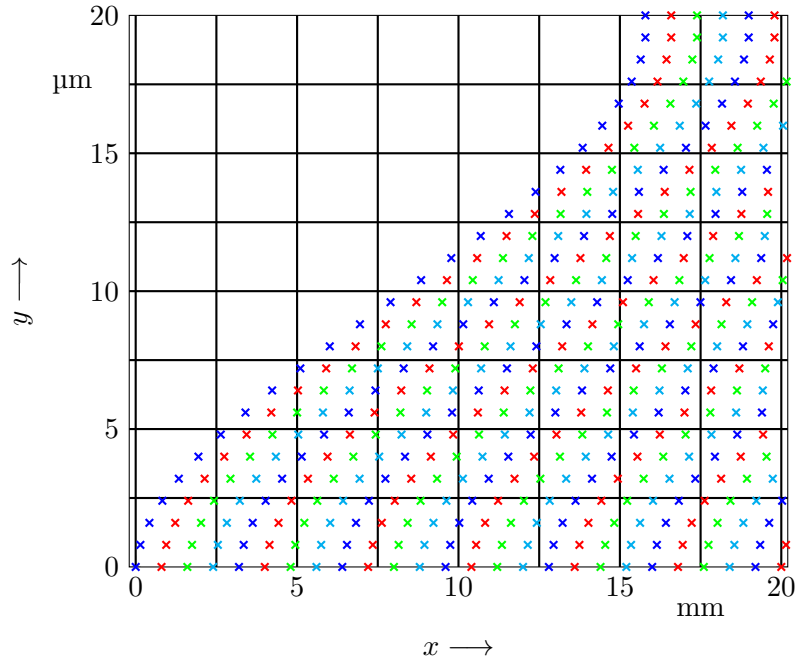


Abbildung 2.21. Rastereinteilung mit $n_{Raster} = 8$ zur Auszählung der einzelnen virtuellen Ionen.

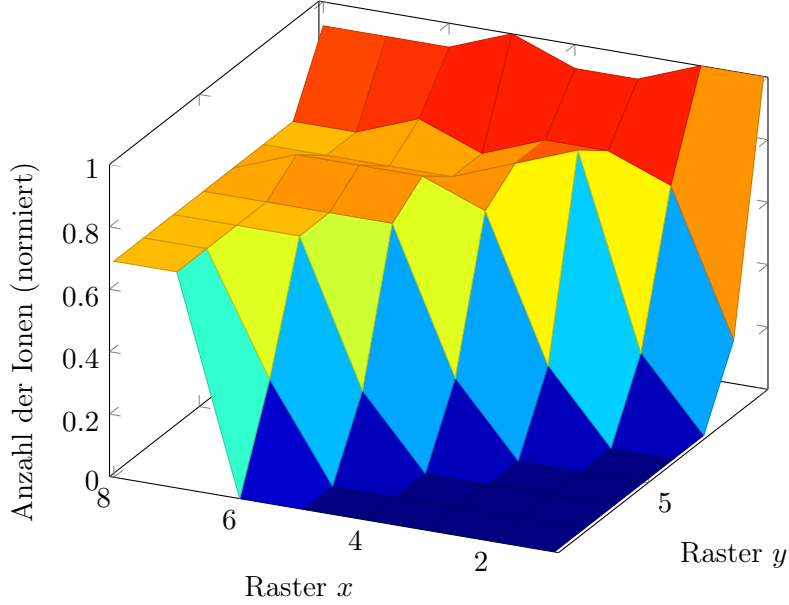


Abbildung 2.22. Darstellung der normierten Ionenverteilung aus Abbildung 2.21. Das Raster ist in diesem Falle recht grob gewählt und sollte für praktische Berechnungen wesentlich feiner sein.

Für die Bestimmung des Ätzprofils wird der Kanal in n_{Raster} senkrechte Streifen geschnitten, welche die einzelnen parallelgeschalteten elektrischen Widerstände repräsentieren (vgl. Abbildung 2.16). Die Auswertung erfolgt wie bei dem Raster, mit dem Unterschied, dass nur der x -Wert eines Koordinatenpaares betrachtet werden muss. Das Ergebnis eines jeden Streifens entspricht somit der Summe der Ionen aller Rasterelemente eines x -Koordinatenbereiches. Die Auswertung läuft damit wesentlich schneller ab. Die Ergebnisse werden in dem Vektor $S_{Ion}(k)$ mit n_{Raster} Elementen abgelegt. Abschließend wird der Vektor wieder auf Eins normiert, damit er unabhängig von der Anzahl der Streifen und der Anzahl der Koordinatenpaare ist. Das Ergebnis für die in Abbildung 2.21 gezeigte Ionenverteilung ist in Abbildung 2.23 dargestellt.

Die Ätztiefe des Grabens wird mit dem ersten Faradayschen Gesetz bestimmt. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Ätzrate ohne Einfluss der gelösten Metallionen dem Ergebnis des Faradayschen Gesetzes entspricht, weil hier die Stromdichte nur durch die Grundleitfähigkeit des Elektrolyten bestimmt wird. Im Verlauf des Kanals erhöht sich dann die Ätzrate mit der Anzahl der gelösten Metallionen oder nimmt aufgrund der Abschirmung ab. Weil das Modell nicht quantitativ berechnet wie viele Metallionen gelöst werden, sondern nur wie die Ionenverteilung qualitativ ausfällt, muss an dieser Stelle auf ein Ergebnis der FEM-Simulation (Abschnitt 2.1.5.1) zurückgegriffen werden. Hier wurde der Strukturfaktor F_S ermittelt, welcher das Verhältnis der Grabentiefen am Anfang und am Ende der Gegenelektrode darstellt. Über diesen Umweg wird in gewissem Maße auch die Abschirmung in diesem Modell berücksichtigt, welches ansonsten nur für sehr hohe Stromdichten (kein Abschirmeffekt) Gültigkeit besitzen würde.

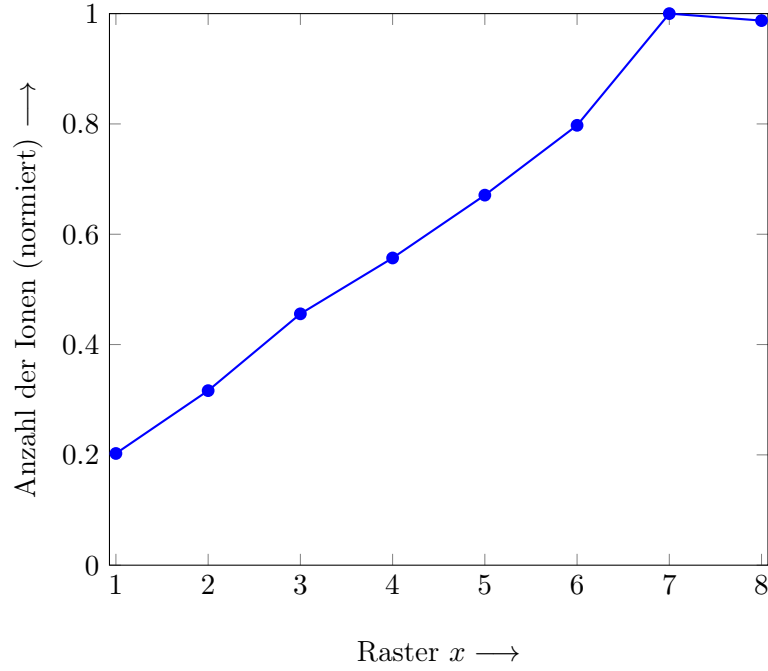


Abbildung 2.23. Darstellung der relativen Ionenverteilung $S_{Ion}(k)$ aus Abbildung 2.21 entlang des Kanalquerschnitts.

Die Abtragsrate $K_{Abtr.}$ für Fe^{3+} -Ionen pro Ladungseinheit wurde in Gleichung 2.7 (siehe Seite 32) bestimmt. Sie beträgt $K_{Abtr.} = 2,4494 \times 10^{-11} \text{ m}^3/\text{As}$. Multipliziert mit der Ladungsmenge Q und geteilt durch die Fläche der Gegenelektrode folgt für die y -Koordinate der Struktur

$$y_{Graben}(k = 1..n_{Raster}) = \frac{Q \cdot K_{Abtr.}}{l_{GE} \cdot b_{GE}} \cdot (1 + (F_S - 1) \cdot S_{Ion}(k)) \quad , \quad (2.37)$$

wobei dieser Ausdruck durch den Strukturfaktor F_S und die normierte Anzahl der Ionen im k -ten Streifen $S_{Ion}(k)$ korrigiert wird. $F_S = 1$ bedeutet, dass sowohl der Anfang als auch das Ende des Grabens gleich tief sind. Für $F_S > 1$ ist das Ende tiefer als der Anfang, für $F_S < 1$ ist das Ende flacher. Die Werte von $S_{Ion}(k)$ liegen durch die Normierung zwischen null und eins. Für die Tiefe des Grabens y_{Graben} bedeuten diese Werte, dass der Graben für $F_S \geq 1$ mindestens die Tiefe $Q \cdot K_{Abtr.}/l_{GE} \cdot b_{GE}$ hat. Bei $F_S < 1$ ist zumindest der Anfang des Grabens immer mindestens $Q \cdot K_{Abtr.}/l_{GE} \cdot b_{GE}$ tief, weil die Werte von $S_{Ion}(k)$ in diesem Bereich nahe null sind. Diese Eigenschaft bedeutet in der Realität, dass die Ätzrate ohne den Einfluss der gelösten Metallionen dem Faradayschen Gesetz unterliegt.

Der resultierende Graben für die Ionenverteilung in Abbildung 2.23 ist in Abbildung 2.24 dargestellt.

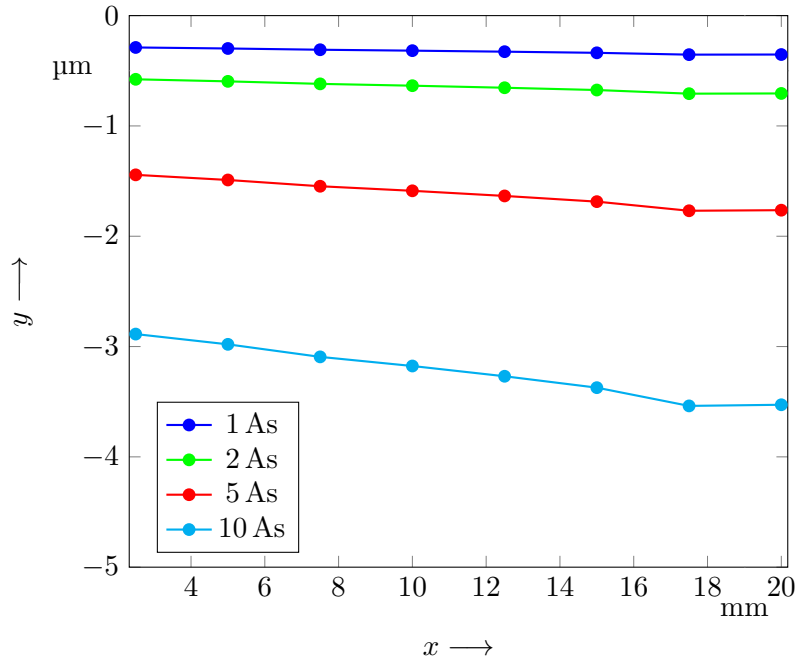


Abbildung 2.24. Resultierender Graben bei Ionenverteilung wie in Abbildung 2.23 für verschiedene Ladungsmengen.

2.2.4. Ergebnisse

Wie für die FEM-Simulation werden in diesem Abschnitt einige Berechnungsergebnisse betrachtet. Dazu werden zunächst Berechnungen von Kanälen mit konstanter Breite mit den Ergebnissen der FEM-Simulation verglichen. Anschließend wird die Kanalbreite variiert, um abschätzen zu können, in wie weit damit das Strukturprofil beeinflusst werden kann. Wie zuvor bei den Berechnungen mit dem FEM-Modell wird die Strukturtiefe über die geflossene Ladungsmenge bestimmt.

2.2.4.1. Kanäle mit konstanter Breite

Abbildung 2.25 zeigt das Ergebnis für einen 20 μm hohen Kanal bei einer Stromdichte von 10 A/cm² (bzw. gepulsten 100 A/cm² mit 10 % Pulsweite) und 1 bar Druckdifferenz. Der Strukturfaktor beträgt 1,36. Es fällt im Vergleich mit dem FEM-Ergebnis in Abbildung 2.4d auf Seite 35 auf, dass der Graben hier eine konvexe Form hat, während er bei dem FEM-Ergebnis nahezu linear verläuft. Dies lässt einerseits mit der nicht berücksichtigten Abschirmung der Gegenelektrode aufgrund der positiv geladenen Metallionen erklären, andererseits aber auch dadurch, dass die Änderung der Kanalhöhe durch den Abtrag nicht berücksichtigt wird. Der Elektrolyt würde dadurch langsamer fließen und die gelösten Ionen würden entsprechend weniger schnell fortgespült. Dies bewirkt eine weitere Leitfähigkeitserhöhung und damit einen stärkeren Abtrag.

Die Ergebnisse für 50 μm und 100 μm hohe Kanäle werden in den Abbildungen 2.26 und

2. Modellierung

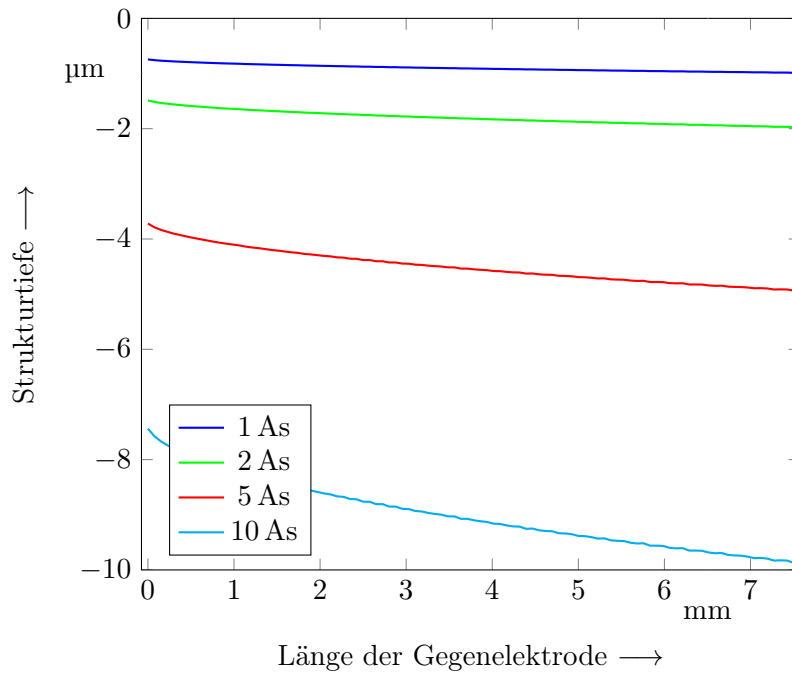


Abbildung 2.25. Berechnungsergebnis Strukturprofil. Kanalhöhe $h_{\text{Kanal}} = 20 \mu\text{m}$, Stromdichte $J = 10 \text{ A/cm}^2$, Druck $p_{\text{in}} = 1 \text{ bar}$, Strukturfaktor $F_S = 1,36$.

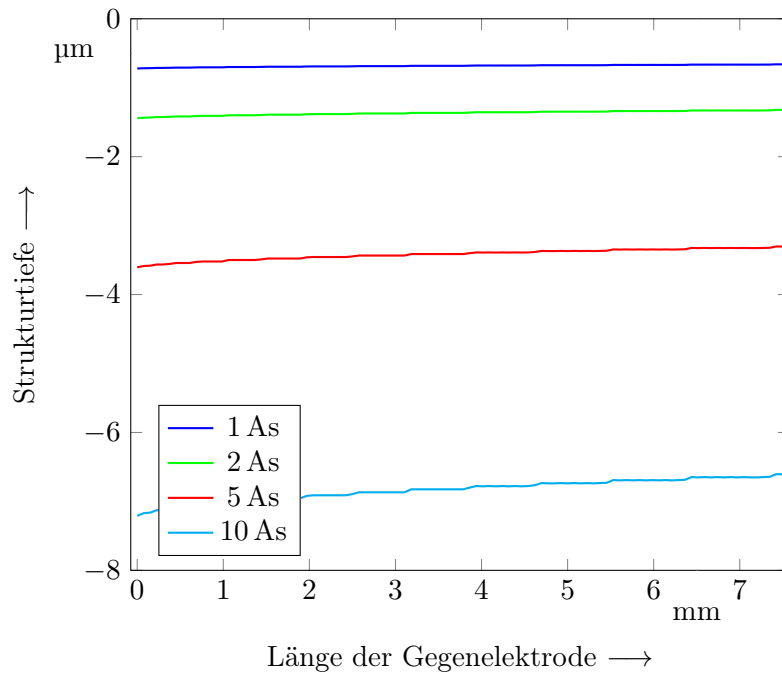


Abbildung 2.26. Berechnungsergebnis Strukturprofil. Kanalhöhe $h_{\text{Kanal}} = 50 \mu\text{m}$, Stromdichte $J = 10 \text{ A/cm}^2$, Druck $p_{\text{in}} = 1 \text{ bar}$, Strukturfaktor $F_S = 0,91$.

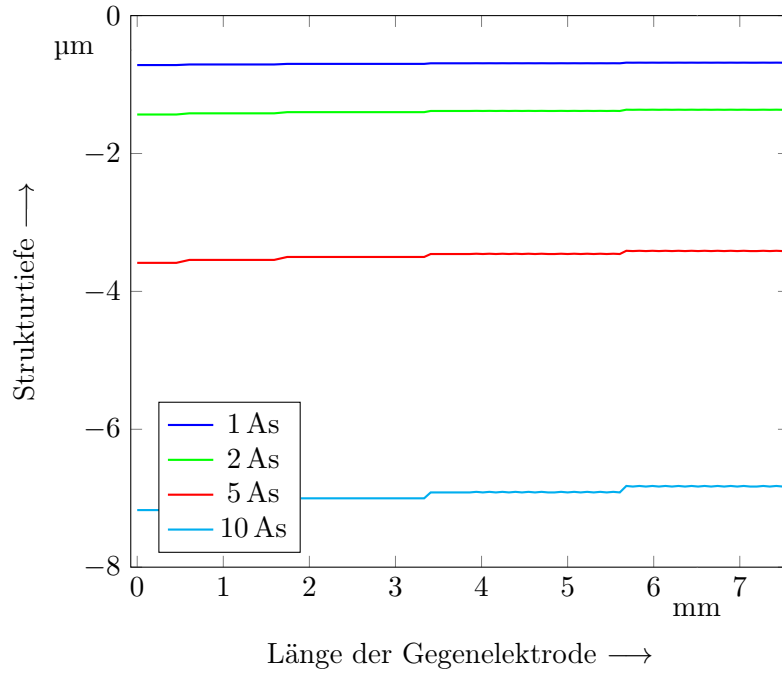


Abbildung 2.27. Berechnungsergebnis Strukturprofil. Kanalhöhe $h_{Kanal} = 100 \mu\text{m}$, Stromdichte $J = 10 \text{ A/cm}^2$, Druck $p_{in} = 1 \text{ bar}$, Strukturfaktor $F_S = 0,94$.

2.27 gezeigt. Die Stufen, die insbesondere bei den 10 As-Linien sichtbar sind, entstehen durch eine geringe Anzahl an Metallionen, weil die S-förmigen Pfade der Metallionen durch die größere Kanalhöhe und damit einhergehend höhere Strömungsgeschwindigkeit sehr flach ausfallen. Die Profile sind aber sehr ähnlich zu den FEM-Simulationen (vgl. Abbildungen 2.5d und 2.6d ab Seite 36). Der Unterschied besteht darin, dass bei der FEM-Simulation die Strukturtiefe zunächst stark abnimmt, um dann auf einem relativ konstanten Niveau zu verharren, während hier die Tiefe entsprechend der Ionenverteilung abnimmt. Weil die Strukturfaktoren mit $F_S = 0,91$ bzw. $F_S = 0,94$ kleiner als eins sind, nimmt zwar auch die Strukturtiefe ab, es fehlt aber ebenfalls die Abschirmung und die Berücksichtigung der Änderung der Kanalhöhe.

Obwohl bei der Modellbildung zahlreiche Vereinfachungen vorgenommen wurden, liefert das analytische Modell im Vergleich mit der FEM-Simulation für Kanäle mit konstanter Breite gute Ergebnisse. Abbildung 2.28 zeigt die Ergebnisse für verschiedene Kanalhöhen bei einer Stromdichte von 10 A/cm^2 und einer Druckdifferenz von 1 bar im Vergleich. Während das analytische Modell eine geringere Strukturtiefe bei $50 \mu\text{m}$ und $100 \mu\text{m}$ hohen Kanälen vorhersagt, sagt es für $20 \mu\text{m}$ hohe Kanäle eine im Mittel größere Strukturtiefe voraus. Bei dieser Tiefe berechnet das FEM-Modell einen nahezu linearen Anstieg der Strukturtiefe, wohingegen die Strukturtiefe beim Ergebnis des analytischen Modells zunächst stärker zunimmt, um anschließend flacher zu werden. Für die Berechnung mit dem analytischen Modell wird wesentlich weniger Zeit benötigt und hängt hauptsächlich von der Anzahl der benötigten Koordinatenpaare und der Rastergröße ab. Es ist jedoch

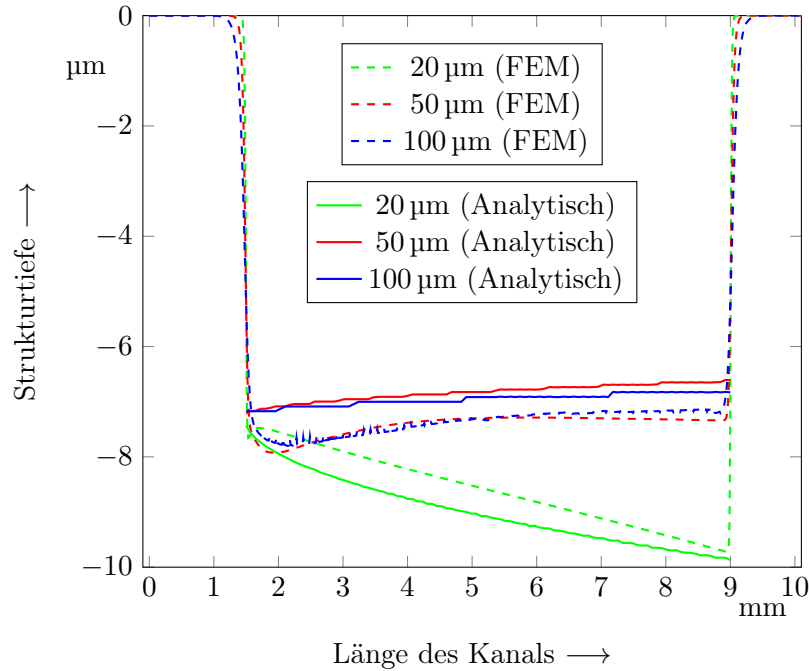


Abbildung 2.28. Strukturprofile des FEM- und des analytischen Modells im direkten Vergleich. Stromdichte $J = 10 \text{ A/cm}^2$, Druck $p_{in} = 1 \text{ bar}$.

notwendig, den Strukturfaktor, also das Verhältnis der Strukturturen am Anfang und am Ende der Gegenelektrode, zu kennen. Mit etwas Erfahrung lässt sich dieser jedoch für verschiedene Parameterkombinationen gut schätzen.

2.2.4.2. Kanäle mit variabler Breite

Die Strukturture lässt sich durch die Geometrie des fluidischen Kanals beeinflussen. Im Vergleich von FEM-Simulation und analytischer Berechnung fiel im vorhergehenden Abschnitt auf, dass der zunehmende Abtrag und damit die zunehmende Kanalhöhe einen Einfluss auf das Ergebnis hat. Die Kanalhöhe geht in der dritten Potenz in den Volumenstrom und damit quadratisch in die Strömungsgeschwindigkeit ein.

Bei der Herstellung der Gegenelektroden ist es möglich, die Form der Kanäle zu gestalten (siehe Abbildung 2.29). Während die Kanalhöhe der Gegenelektroden konstant bleiben muss, lässt sich jedoch deren Breite variieren. Aufgrund des Massenerhaltungssatzes ist der Volumenstrom in dem Kanal konstant, sodass die Strömungsgeschwindigkeit sich bei einem verengenden Querschnitt erhöhen muss bzw. sich bei einer Vergrößerung des Querschnitts verlangsamt. Auf diese Weise lässt sich das Strömungsprofil beeinflussen.

Ein sich verengender fluidischer Kanal bewirkt, dass der Elektrolyt beschleunigt wird. Die Geschwindigkeitskomponente der Ionen in x -Richtung nimmt im Verlauf des Kanals zu. Das hat zur Folge, dass auch die gelösten Metallionen schneller fortgespült werden, so dass der Einfluss der Leitfähigkeitserhöhung weniger stark zur Geltung kommen sollte.

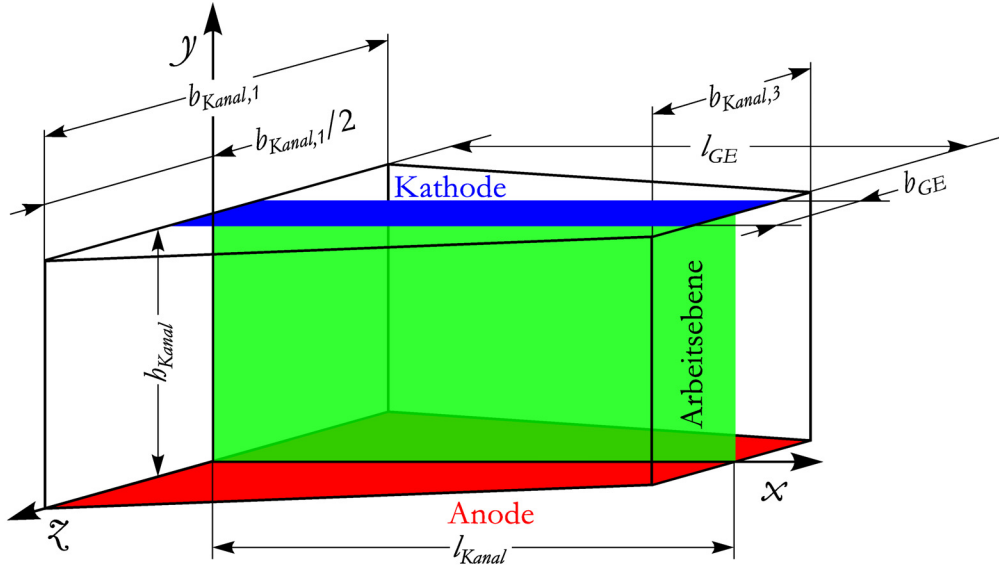


Abbildung 2.29. Schematische Darstellung eines Kanals mit zulaufendem Querschnitt, vgl. auch Abbildung 2.18.

Das Strukturprofil fällt also weniger stark ab.

Eine Vergrößerung der Kanalbreite hingegen verlangsamt die x -Komponente der Geschwindigkeit der Ionen. Im gleichen Zeitabschnitt legen sie demnach eine kürzere Strecke zurück und die Konzentration der Ionen erhöht sich im Verlauf des Kanals. Dies bewirkt eine Verstärkung der Leitfähigkeit und damit der Stromdichte, sodass das Strukturprofil im Verlaufe des Kanals stärker zunimmt als bei einem Kanal mit konstanter Breite.

Abbildung 2.30 zeigt das Ergebnis für einen von 6 mm auf 2 mm Breite zulaufenden Kanal (vgl. Abschnitt 2 in Abbildung 2.18 auf Seite 50). Ansonsten sind die Parameter identisch mit den Parametern in Abbildung 2.25. Weil der Strukturfaktor für diese Kanalform nicht bekannt ist, wurde er von dem geraden Kanal übernommen. Damit sind beide Strukturen am Anfang und am Ende gleich tief, lediglich die Kontur dazwischen wird über die Ionenverteilung von der Strömungsgeschwindigkeit beeinflusst. Die Strukturtiefe steigt im ersten Drittel des Kanals stärker an als bei dem Kanal mit konstantem Querschnitt, um für den Rest der Kanallänge weniger stark zu steigen. Besonders deutlich wird dies im Vergleich zum Ergebnis des FEM-Modells für einen geraden Kanal (Abbildung 2.4d auf Seite 35), bei dem die Strukturtiefe nahezu linear vom Anfang bis zum Ende hin zunimmt.

In Abbildung 2.31 ist die Berechnung für einen Kanal abgebildet, dessen Breite von 2 mm auf 6 mm ansteigt. Der Elektrolyt verlangsamt sich im Laufe des Kanals. Hier wurde ebenfalls der Strukturfaktor für den geraden Kanal übernommen. Die Zunahme der Ionenkonzentration bewirkt, dass die Struktur zunächst relativ flach bleibt, um zum Ende stärker an Tiefe zuzunehmen.

In der Realität werden sich die zulaufenden und erweiternden Kanäle etwas anders verhalten. Der Abschirmeffekt und die Zunahme der effektiven Kanalhöhe werden ver-

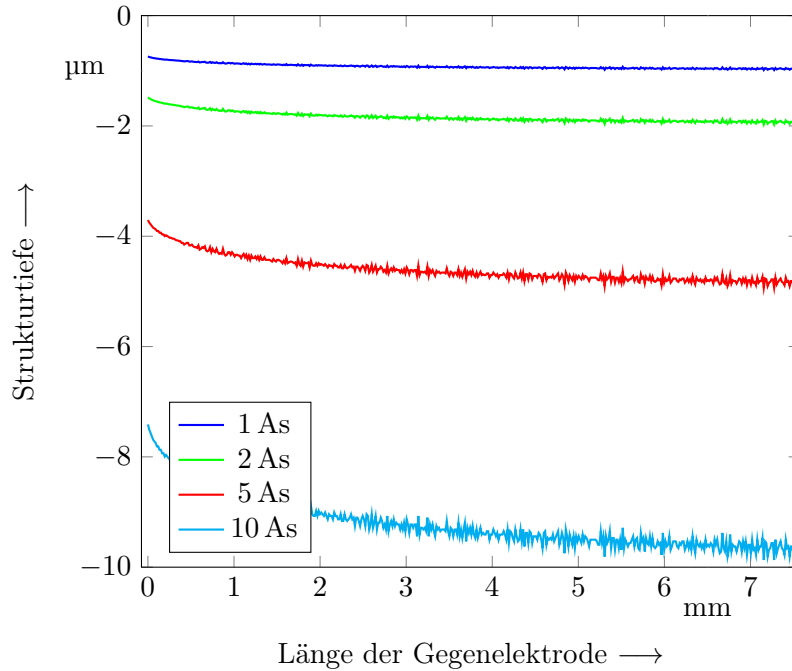


Abbildung 2.30. Berechnetes Strukturprofil eines von 6 mm auf 2 mm Breite zulaufenden Kanals. Kanalhöhe $h_{\text{Kanal}} = 20 \mu\text{m}$, Stromdichte $J = 10 \text{ A/cm}^2$, Druck $p_{\text{in}} = 1 \text{ bar}$, Strukturfaktor $F_S = 1,36$.

nachlässigt. Ein weiterer, wichtiger Faktor ist der Strukturfaktor. Dieser sollte bei dem zulaufenden Kanal etwas geringer ausfallen, weil am Ende der Struktur weniger Metallionen als beim geraden Kanal vorhanden sind und damit die Abtragsrate niedriger ausfällt. Bei dem sich erweiternden Kanal ist das Gegenteil der Fall, hier würde der Strukturfaktor durch die höhere Ionenkonzentration größer ausfallen. Damit wird der zulaufende Kanal den Verlauf der Strukturtiefe positiv beeinflussen, indem sie weniger stark zunimmt. Der erweiternde Kanal hingegen verschärft das Problem zusätzlich. Die jeweils korrekten Strukturfaktoren müssen für verschiedene Parametersätze experimentell bestimmt werden.

2.3. Designregeln

Aus den Berechnungsergebnissen lassen sich Designregeln ableiten. Weil sich die verschiedenen Parameter gegenseitig stark beeinflussen, ist eine Berechnung des Prozesses notwendig, um das gewünschte Ergebnis vorauszubestimmen. Explizite numerische Werte lassen sich daher nicht pauschal festlegen.

- Eine hohe Stromdichte bewirkt eine hohe Abtragsrate.
- Je höher die Stromdichte, desto stärker nimmt bei gleicher Kanalhöhe die Tiefe des Grabenprofils zu.

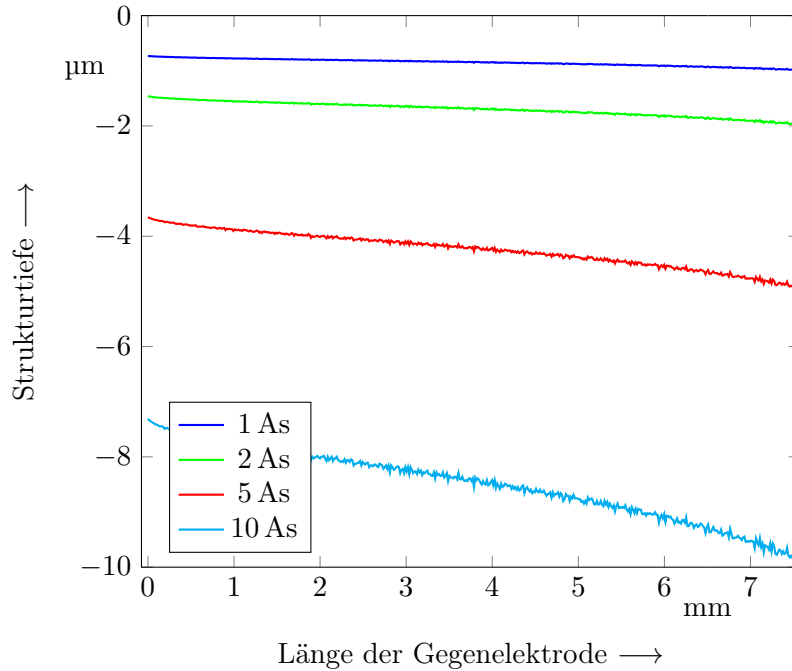


Abbildung 2.31. Berechnetes Strukturprofil eines sich von 2 mm auf 6 mm Breite erweiternden Kanals. Kanalhöhe $h_{Kanal} = 20 \mu\text{m}$, Stromdichte $J = 10 \text{ A/cm}^2$, Druck $p_{in} = 1 \text{ bar}$, Strukturfaktor $F_S = 1,36$.

- Je schneller der Elektrolyt fließen kann, desto geringer fällt die Zunahme des Strukturprofils aus. Lediglich bei unbewegtem Elektrolyten sollte das Strukturprofil über die gesamte Geometrie konstant bleiben, weil sowohl Abschirmung und Leitfähigkeitserhöhung über die gesamte Gegenelektrodenlänge konstant bleiben.
- Mittels der Faktoren K_c und K_F lässt sich das Verhältnis von Abschirmung und Leitfähigkeitserhöhung in Abhängigkeit von der Kanalhöhe bestimmen. Insbesondere bei Kanälen über $20 \mu\text{m}$ Höhe überwiegt die Abschirmung, darunter die Leitfähigkeitserhöhung.
- Durch eine zunehmende Metallionenkonzentration wird das elektrische Feld fokussiert und die laterale Strukturauflösung nimmt zu.
- Über die Wahl der Kanalgeometrie lässt sich das Strukturprofil beeinflussen. Ein zulaufender Kanal beschleunigt den Elektrolyten im Verlaufe der Gegenelektrode und gelöste Metallionen werden schneller abtransportiert. In Prozessen mit überwiegender Leitfähigkeitserhöhung bewirkt dies ein homogeneres Strukturprofil. Bei einem sich verbreiternden Kanal verlangsamt sich der Elektrolyt jedoch und die Strukturtiefe nimmt noch einmal zu.

3. Gegenelektroden

In diesem Kapitel wird die Herstellung der Gegenelektroden beschrieben. Dabei wird auf die Ergebnisse der Modellierung zurückgegriffen. Die technologischen Schritte werden nach und nach verfeinert: Zunächst wird der Herstellungsprozess einfacher, planarer Gegenelektroden beschrieben. Anschließend werden diese flexibel gestaltet, um gekrümmte Oberflächen strukturieren zu können. Die mehrlagigen und damit aufwändigsten Elektroden werden zum Schluss des Kapitels vorgestellt.

Planare Gegenelektroden kommen zum Einsatz, wenn das Werkstück ebenfalls planar und als Gesamtes leitfähig ist. Das bedeutet, dass durch den Materialabtrag keine durch die Strukturierung elektrisch isolierten Inseln entstehen können. Dies ist insbesondere bei dünnen metallischen Schichten auf einem Isolator der Fall. Sollen in einen metallischen, ebenen Körper Strukturen eingebracht werden, sind planare Gegenelektroden die technologisch einfachste und kostengünstigste Methode.

Flexible Gegenelektroden erweitern die Möglichkeiten der planaren Elektroden und können auf zylindrischen Oberflächen eingesetzt werden. Sie haben weiterhin die Beschränkung, dass das zu strukturierende Material als Gesamtes leitfähig sein muss, um Inseln zu vermeiden.

Das größte Einsatzspektrum bieten mehrlagige flexible Gegenelektroden. Sie sind auf zylindrischen Werkstücken einsetzbar und bieten zusätzlich die Möglichkeit, in einer Aufspannung verschiedene Bereiche unabhängig voneinander zu strukturieren. So lassen sich Inseln auf isolierenden Substraten mit dünnen Metallisierungen vermeiden, indem in einem ersten Strukturierungsschritt die verbleibende Struktur zunächst kontaktiert bleibt, um in einem zweiten Schritt von dem Rest getrennt zu werden. Es lassen sich aber durch verschiedene Stromdichten und/oder Ladungsmengen in unterschiedlichen Bereichen in einer Aufspannung auch verschiedene Strukturturen realisieren. Die Gegenelektroden sind aufwändig in der Herstellung, sodass der Einsatzzweck genau evaluiert werden muss.

Im Gegensatz zu herkömmlichen Werkzeugelektroden wird bei allen hier vorgestellten Varianten der Werkzeugspalt nicht durch eine externe Anlage mit einer entsprechenden Regelung realisiert, sondern wird in der Gegenelektrode selbst integriert. Gleichzeitig wird auf diese Weise der fluidische Kanal hergestellt, sodass die Kanalhöhe sehr konstant über die gesamten Strukturausmaße und damit nicht variabel ist. Dafür ist der Gesamtprozess sehr kostengünstig und bietet die Möglichkeit, die Strukturtiefe in gewissen Bereichen über die Kanalform zu beeinflussen.

3.1. Planare Gegenelektroden

Planare Gegenelektroden sind die technologisch einfachste und damit wirtschaftlich günstigste Form der Gegenelektroden. Sie lassen sich mit MEMS-Standardprozessen

3. Gegenelektroden

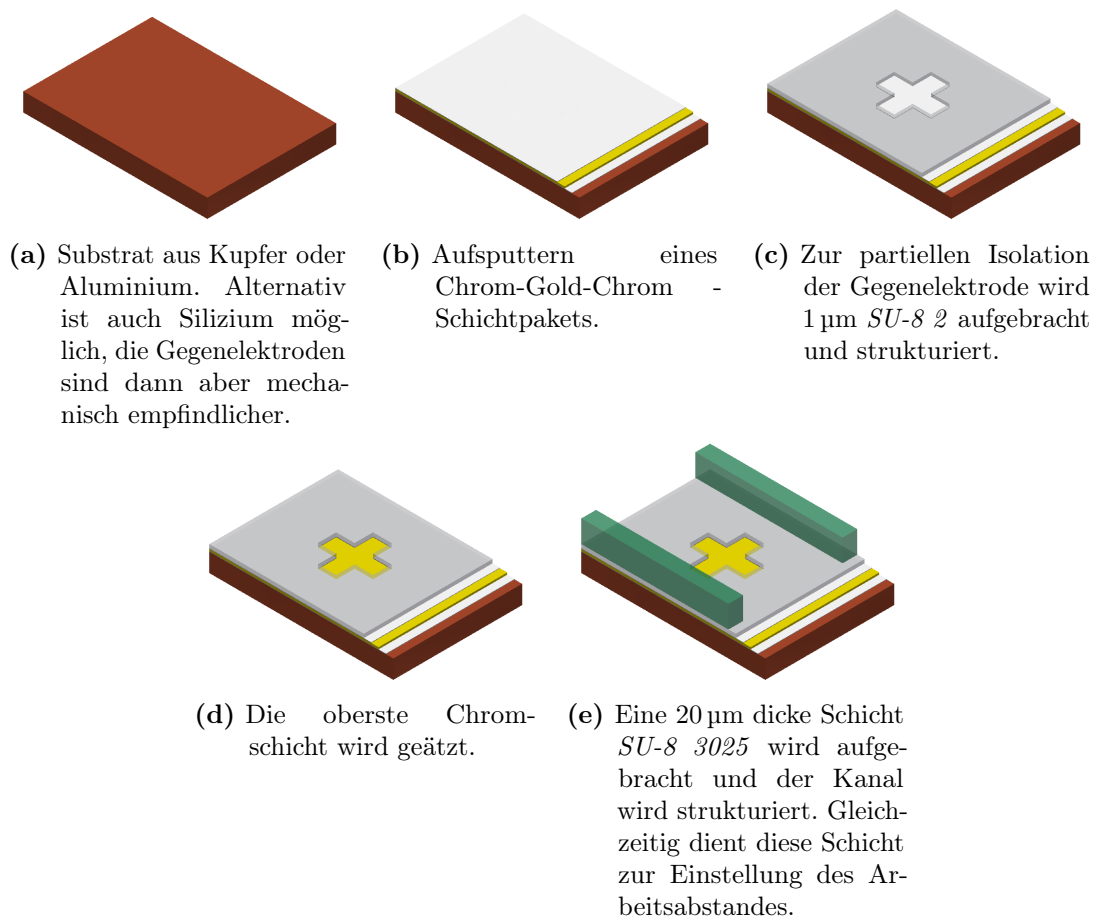


Abbildung 3.1. Ablauf der einzelnen Arbeitsschritte zur Herstellung planarer, starrer Gegenelektroden. Die Darstellungen sind nicht maßstabsgerecht.

herstellen.

Die Basis bildet ein leitfähiges Substrat, beispielsweise Kupfer oder Aluminium (Abbildung 3.1a). Es ist ebenfalls möglich, Silizium-Wafer zu verwenden, nur sind die damit hergestellten Gegenelektroden spröde und damit mechanisch wesentlich empfindlicher. Auf das Substrat wird ein leitfähiges Schichtpaket aus Chrom, Gold und nochmals Chrom gesputtert (Abbildung 3.1b). Das Chrom wird als Haftschicht sowohl gegenüber dem Substrat als auch gegenüber der nachfolgenden Schicht benötigt, da Gold nur unzureichend haftet. Die später freigelegte Goldschicht bewirkt, dass das Substrat chemisch beständig gegen möglicherweise zur Reinigung verwendete Säuren und Laugen gemacht wird. Im Falle elektrisch isolierender Substrate muss die Goldschicht so stark sein, dass sie die notwendigen elektrischen Ströme leiten kann, ohne sich zu stark zu erhitzen. Das würde die nachfolgende Polymerschicht negativ beeinflussen. Diese besteht aus einer 1 μm starken

Schicht *SU-8 2* (Abbildung 3.1c). *SU-8* ist ein photostrukturierbares Polymer, das sich durch eine besonders hohe chemische Stabilität auszeichnet. Nach dem Vernetzen ist es mit den meisten Chemikalien nicht mehr entfernbar. Die Schicht wird photolithographisch mit der auf das Werkstück zu übertragenden Form strukturiert. Die darunter liegende Chromschicht liegt nun an einigen Stellen offen, sodass diese Stellen nun geätzt werden können bis die Goldschicht frei liegt (Abbildung 3.1d).

Abschließend wird der fluidische Kanal und Abstandshalter für den Arbeitsabstand hergestellt. Dazu wird eine 20 μm hohe Schicht aus *SU-8 3025* aufgebracht und strukturiert (Abbildung 3.1e).

3.2. Flexible Gegenelektroden

Flexible Gegenelektroden erweitern die Möglichkeiten der planaren Elektroden um die Möglichkeit, zylindrische Flächen zu strukturieren. Sie werden zunächst auf einem starren Substrat planar hergestellt, im letzten Bearbeitungsschritt werden sie davon gelöst. Damit bestehen sie ausschließlich aus flexiblen Polymerfolien mit einer integrierten Metallisierung.

Der Herstellungsprozess beginnt mit einem Standard-Siliziumwafer (Abbildung 3.2a). Er dient lediglich als Handlingwafer und kann nach Abschließen der Prozessierung wiederverwendet werden.

Auf den Wafer wird ein Trockenresist, *Laminar E8015*, aufgebracht (Abbildung 3.2b). Entgegen der Herstellervorgaben wird jedoch die obere Schutzfolie nach dem Auflaminieren nicht entfernt, sondern verbleibt auf dem Wafer. Der Resist wird zum Vernetzen flutbelichtet, jedoch nicht weiter strukturiert.

Zur Abschirmung der Schutzfolie vor Chemikalien wird eine 5 μm dicke Schicht *SU-8 2005* aufgebracht und flutbelichtet. Sie verhindert, dass sich die chemisch nicht sehr stabile Schutzfolie des *E8015* vorzeitig ablöst, wenn nachfolgende Schichten mit Ätzmedien oder Lösemitteln in Kontakt kommen. *SU-8* legt sich dabei auch um den Rand des Wafers, so dass von hier keine Medien eindringen können.

Damit die Gegenelektrode die notwendige mechanische Stabilität verliehen bekommt, wird nun eine Lage *Conformask 2515* (38 μm dick) auflaminiert. *Conformask* ist ein Lötstopplack und wird auch nach dem Aufenthalt im Vakuum bzw. durch Plasmaprozesse wie Sputtern nicht spröde wie *SU-8*, sondern behält seine Flexibilität.

Ab diesem Schritt läuft die Prozessierung wie bei den planaren Gegenelektroden ab. Das Chrom-Gold-Chrom-Schichtpaket wird aufgesputtert und durch eine *SU-8 2* Schicht partiell isoliert. Nach der Chrom-Ätzung folgt die Herstellung des fluidischen Kanals.

Im letzten Schritt wird die Gegenelektrode von dem Handlingwafer getrennt. Dazu wird mit einem Skalpell zunächst der Rand angeritzt, um die Schutzfolie des *E8015* etwas zu lösen. Diese lose Stelle nutzt man nun, um mit Hilfe eines Blattes Papier das gesamte System abzulösen. Das Papier ist flach genug und bietet hinreichende Stabilität, sodass die Ablösung zügig von statten geht. Die Schutzfolie lässt sich durch die bei den einzelnen Prozessschritten notwendige Temperierung nicht so leicht wie im Urzustand abziehen. Alternative Methoden wie die Nutzung von Chrom-Gold Schichtsystemen, die

3. Gegenelektroden

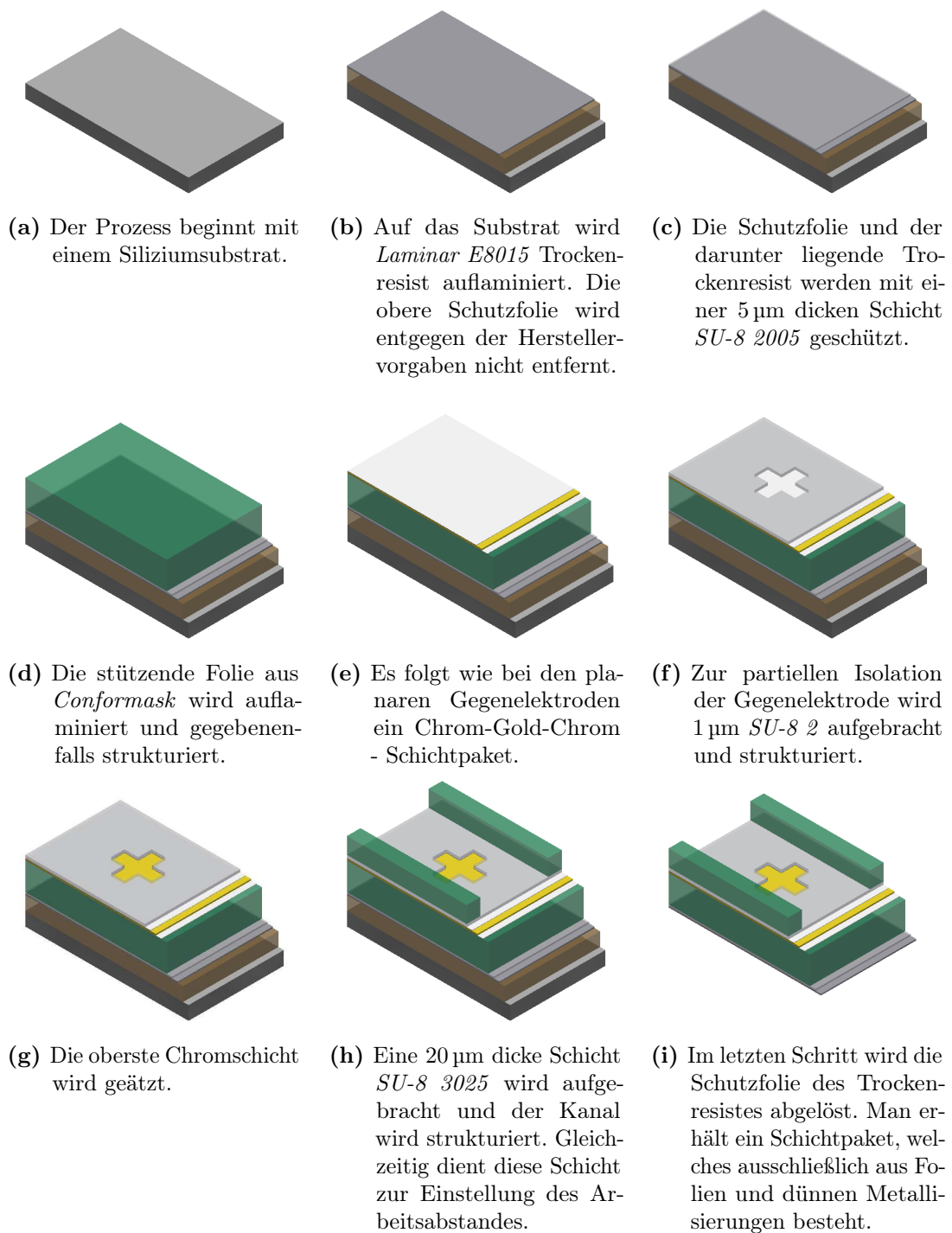


Abbildung 3.2. Ablauf der einzelnen Arbeitsschritte zur Herstellung flexibler, einlagiger Gegenelektroden. Die Darstellungen sind nicht maßstabsgerecht.

über die komplette Wafergröße unterätzt werden, benötigen wesentlich mehr Zeit und die Polymerschichten würden in dem Ätzmedium Schaden nehmen.

Falls notwendig, lässt sich auch der am System verbleibende Schutzfilm des Trockenresistes entfernen. Die Vereinzelung erfolgt durch Schneiden.

3.3. Mehrlagige Gegenelektroden

Mit mehrlagigen Gegenelektroden können in einer Aufspannung mehrere voneinander getrennte Bereiche strukturiert werden. Dies bringt zahlreiche Vorteile mit sich:

- Keine Ausrichtung mehrerer Gegenelektroden mit dem Substrat notwendig: Hohe Präzision erreichbar.
- Die einzelnen Schichten lassen unterschiedliche Prozesszeiten und/oder Stromdichten zu.
- Je nach Schichtaufbau und baulicher Umgebung nahezu beliebig viele Schichten realisierbar.
- Echte 3D-Strukturen sind auf gekrümmten Oberflächen herstellbar.

Während die vorher beschriebenen einlagigen Gegenelektroden unter anderem einen interessanten Ersatz für herkömmliche Lithographie- und Ätzprozesse darstellen, erweitern die mehrlagigen Gegenelektroden das Einsatzgebiet in Bereiche, die bisher teuren Verfahren wie der Ultrapräzisionsfräsbearbeitung vorbehalten waren.

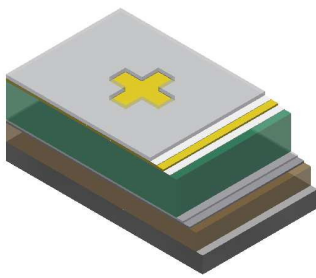
Die hier beschriebene Herstellung basiert auf dem Prozess der flexiblen Gegenelektroden, lässt sich aber auch auf planaren Substraten verwirklichen. Abbildung 3.3a ist identisch mit Abbildung 3.2g des Herstellungsablaufes für flexible Gegenelektroden.

An Stelle des Kanals wird ein zweites Chrom-Gold-Chrom - Schichtpaket abgeschieden (Abbildung 3.3b). Damit es zwischen der neuen und der ersten leitfähigen Schicht nicht zu Kurzschlüssen kommt, muss die neue Schicht im Bereich der ersten Schicht geätzt werden. Dazu wird eine Lithographie mit einem Standardresist durchgeführt (Abbildung 3.3c) und das Schichtpaket geätzt. Da sich Gold und Chrom selektiv ätzen lassen, stoppt die Ätzung automatisch auf der ersten Goldschicht (Abbildung 3.3d). Der Resist wird anschließend entfernt.

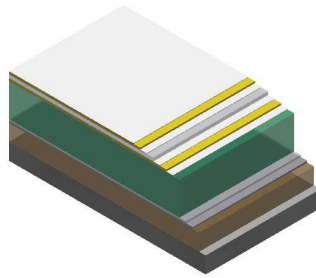
Eine zweite Schicht *SU-8 2* wird aufgetragen und strukturiert. Sie bildet die zweite Gegenelektrodenform und muss sowohl die Geometrie der ersten Schicht, als auch die der zweiten beinhalten (Abbildung 3.3e). Die freiliegende Chromschicht wird ebenfalls geätzt (Abbildung 3.3f). Außerhalb des Kanals müssen zur Kontaktierung der beiden Schichten entsprechende Möglichkeiten vorgesehen werden, die hier nicht abgebildet sind.

Auf diese Weise können weitere Elektrodenschichten hergestellt werden. Die Höhe der Metallisierungen fallen dabei kaum ins Gewicht, wohl aber die Höhe der *SU-8 2* Schichten. Es ist möglich, diese Schichten durch dünnere, isolierende Schichten wie beispielsweise Al_2O_3 zu ersetzen. Die Schichten müssen jedoch so flexibel bleiben, dass sie bei Biegung nicht reißen und dadurch Kurzschlüsse zwischen den Schichten entstehen.

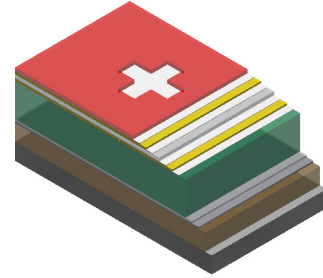
3. Gegenelektroden



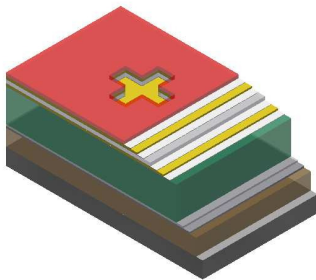
(a) Bis Schritt g aus Abbildung 3.2 ist der Prozess identisch. Mit diesem als Basis wird fortgefahren.



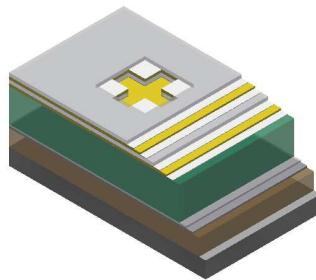
(b) Ein zweites Chrom-Gold-Chrom - Paket wird abgeschieden.



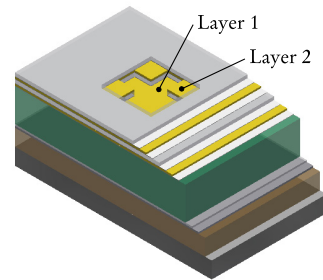
(c) Ein Standard-Photoresist wird aufgetragen und strukturiert.



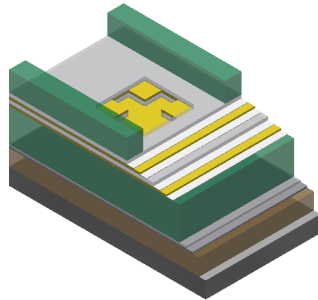
(d) Das Schichtpaket wird geätzt. Anschließend wird der Photoresist entfernt.



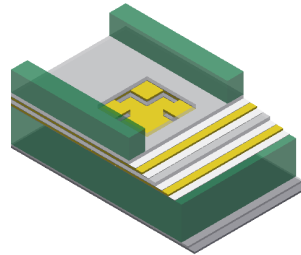
(e) Eine zweite Schicht *SU-8 2* wird abgeschieden und strukturiert. Die Schicht muss sowohl die erste Gegenelektrode freilegen als auch die zweite Strukturebene.



(f) Ätzen der oberen Chromschicht. Das Ätzmedium sollte möglichst wenig unterätzen.



(g) Abschließend wird der Kanal mit *SU-8 3025* und der gewünschten Höhe hergestellt.



(h) Die Trennung vom Substrat vervollständigt den Herstellungsprozess.

Abbildung 3.3. Ablauf der einzelnen Arbeitsschritte zur Herstellung flexibler, mehrlageriger Gegenelektroden. Die Darstellungen sind nicht maßstabsgerecht.

3. Gegenelektroden

Zum Schluss wird wieder der fluidische Kanal aus *SU-8 3025* aufgebaut und die fertige Gegenelektrode von dem Handlingwafer getrennt (Abbildungen 3.3g und 3.3h).

4. Strukturierung

In diesem Kapitel werden der Aufbau der Strukturierereinrichtungen und die damit erzielten Ergebnisse beschrieben. Die Strukturierereinrichtungen bestehen aus den jeweils werkstück-spezifischen mechanisch-fluidischen Komponenten, die das Werkstück aufnehmen und sowohl die fluidische als auch die elektrische Kontaktierung bereitstellen. Hinzu kommen die elektrische Ansteuerung, mit der der benötigte Strom und dessen Regelung realisiert wird und die Designs der verwendeten Gegenelektroden.

Bei den Werkstücken handelt es um Wälzlagerringe aus 100Cr6 Stahl. Für die planaren Versuche werden Lagerringe von Axial-Zylinderrollenlagern des Typs 81111-TV (einseitig wirkend) verwendet, wohingegen Lagerringe von Radial-Zylinderrollenlagern des Typs NU1006-M1 (Loslager, zerlegbar, mit Käfig) die Werkstücke für die Versuche auf zylindrischen Oberflächen darstellen. Die mehrlagigen Gegenelektroden werden auf Edelstahlplatten getestet.

4.1. Aufbau

Der Aufbau gliedert sich in zwei Teile. Die mechanisch-fluidische Komponente wird von einer werkstückspezifischen Aufnahme übernommen, die das Werkstück und die Gegenelektrode in sich aufnimmt. In Abbildung 4.1 sind die jeweiligen Teile mit den Material-, Energie- und Signalflüssen dargestellt. Die Aufnahme wird mittels einer Pumpe mit frischem Elektrolyt gespeist, der innerhalb der Aufnahme zwischen Anode und Kathode in den fluidischen Kanal der Gegenelektrode geleitet wird. Der gebrauchte Elektrolyt verlässt anschließend die Aufnahme, um aufbereitet oder entsorgt zu werden.

Gleichzeitig übernimmt die Aufnahme die elektrische Kontaktierung des Werkstückes und der Gegenelektrode. Von einer Steuerelektronik werden sie mit elektrischer Energie versorgt. Zudem werden einige Messwerte wie elektrischer Strom und Spannung zwischen den Elektroden an die Steuerung zur späteren Fehleranalyse zurückgespeist. Die Steuerung wiederum erhält ihre Signale von einem PC, der auch die Stromquelle schaltet. So ist es möglich, die geflossene Ladung während des Prozesses kontinuierlich zu messen und die Strukturierung automatisch zu beenden, sobald die gewünschte Ladungsmenge geflossen ist.

Abbildung 4.2 zeigt den kompletten Aufbau unter Verwendung der Halterung für flexible Gegenelektroden. Im Vordergrund sind die mechanischen und fluidischen Komponenten abgebildet (Halterung, Pumpe, Elektrolyt), während im Hintergrund die elektrischen Komponenten stehen (Strom- und Spannungsversorgung, Wechselschalter, Datenaufnahme, ohne PC).

4. Strukturierung

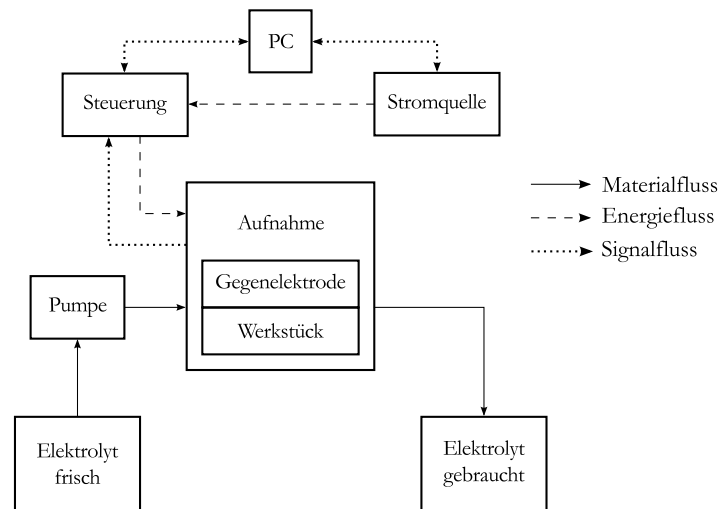


Abbildung 4.1. Blockdiagramm des Strukturieraufbaus.

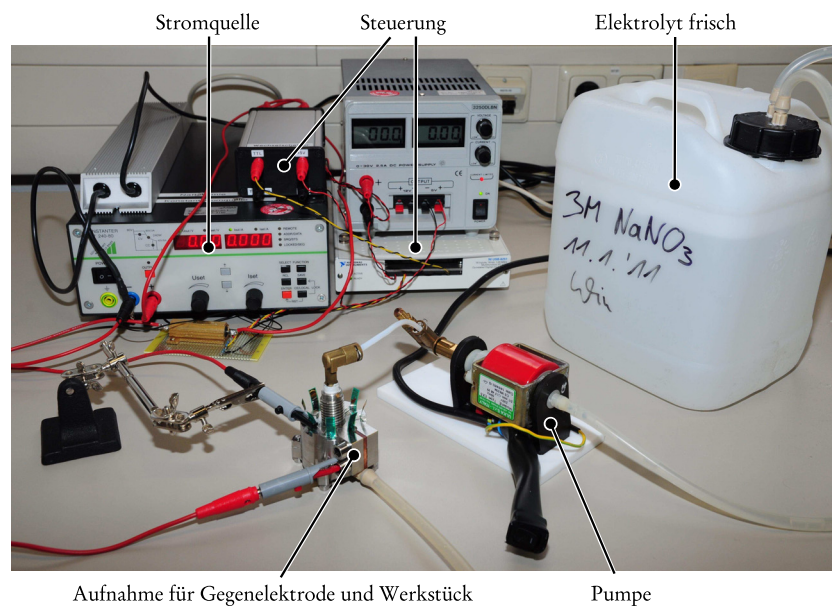


Abbildung 4.2. Aufgebaute Strukturiereinrichtung mit Halterung für flexible Gegenelektroden.

4.1.1. Mechanisch-fluidischer Aufbau

Die Elektrolytversorgung erfolgt mit einer *Ulka EX5* Vibrationspumpe bei den Versuchen mit den planaren und den flexiblen Gegenelektroden, wohingegen bei den mehrlagigen Gegenelektroden eine *Innensys CP4/SP* Vibrationspumpe mit einem Membranregler zum Einsatz kommt. Diese Pumpe hat eine niedrigere Förderleistung ($120 \text{ cm}^3/\text{min}$ gegenüber $650 \text{ cm}^3/\text{min}$ bei der *Ulka*-Pumpe). Der maximal bereitgestellte Druck beträgt jedoch bis zu 20 bar bei der *Innensys*-Pumpe während die *Ulka*-Pumpe maximal 15 bar bereitstellt. Zudem sorgt der Membranregler für eine konstantere Strömung. Die Pumpen sind nicht geregelt und arbeiten mit einer festen Frequenz von 50 Hz. Sie beziehen den Elektrolyten aus einem Behälter und pumpen ihn anschließend über hochdruckfeste Leitungen und entsprechende Anschlüsse in die Aufnahme. Nach dem Prozess fließt der gebrauchte Elektrolyt in ein Behältnis zur Entsorgung oder Aufbereitung. Die Aufbereitung geschieht über Filtration, um damit die hydratisierten Metallionen zu entfernen.

Die Aufnahmen und die Gegenelektroden sind werkstückspezifisch. In den folgenden drei Abschnitten werden die Aufnahmen für plane Flächen (Axiallager), gekrümmte Flächen (Radiallager) und mehrlagige Gegenelektroden auf planaren Flächen beschrieben.

4.1.1.1. Aufnahme für Axial-Lagerring

Die Aufnahme für planare Substrate ist auf Lagerringe von Axial-Zylinderrollenlager des Typs 81111-TV angepasst (Abbildung 4.3). Diese Axiallager weisen plane Laufflächen auf, die strukturiert werden sollen. Die Gegenelektrode besteht aus einem Kupferwafer mit einem Durchmesser von 100 mm und einer Dicke von 0,5 mm. Auf diesem befinden sich mehrere Strukturen, die gleichzeitig übertragen werden. Der Prozess für die Herstellung dieser Gegenelektrode ist in Abschnitt 3.1 beschrieben.

Die Elektrolytversorgung erfolgt von der Außenseite des Laggerrings nach innen. In die Grundplatte aus PTFE wird die Gegenelektrode gelegt. Sie hält eine entsprechend dimensionierte Aussparung vor, sodass die Gegenelektrode plan mit der umgebenden Oberfläche abschließt.

Der Lagerring wird in eine Halterung gepresst, sodass die Abdichtung nach außen gewährleistet ist. Diese Halterung besteht wiederum aus PTFE und die Übergänge werden mit O-Ringen abgedichtet. Der Lagerring ist in dieser Halterung verschiebbar, sodass er später auf die Gegenelektrode gedrückt werden kann und überall plan aufliegt. Außerdem ist er durch größer dimensionierte Befestigungslöcher gegenüber der Grundplatte verschiebbar, sodass über in der Gegenelektrode integrierte Ausrichtemarken der Lagerring zur Gegenelektrode justiert werden kann. Zusätzlich befinden sich in dieser Halterung Strukturen, um die Versorgung mit dem Elektrolyten über den gesamten Umfang des Ringes zu gewährleisten. In das Loch des Lagerrings kommt ein Einsatz, der die innere Abdichtung gewährleistet und einen Anschluss zur Abführung des gebrauchten Elektrolyten besitzt.

Die Grundplatte mit der Gegenelektrode und die Halterung mit dem Lagerring werden übereinandergelegt. Damit liegt der Lagerring direkt auf der Gegenelektrode. Über Verstärkungsplatten aus Stahl werden die Teile aus PTFE mittels Schrauben (nicht abge-

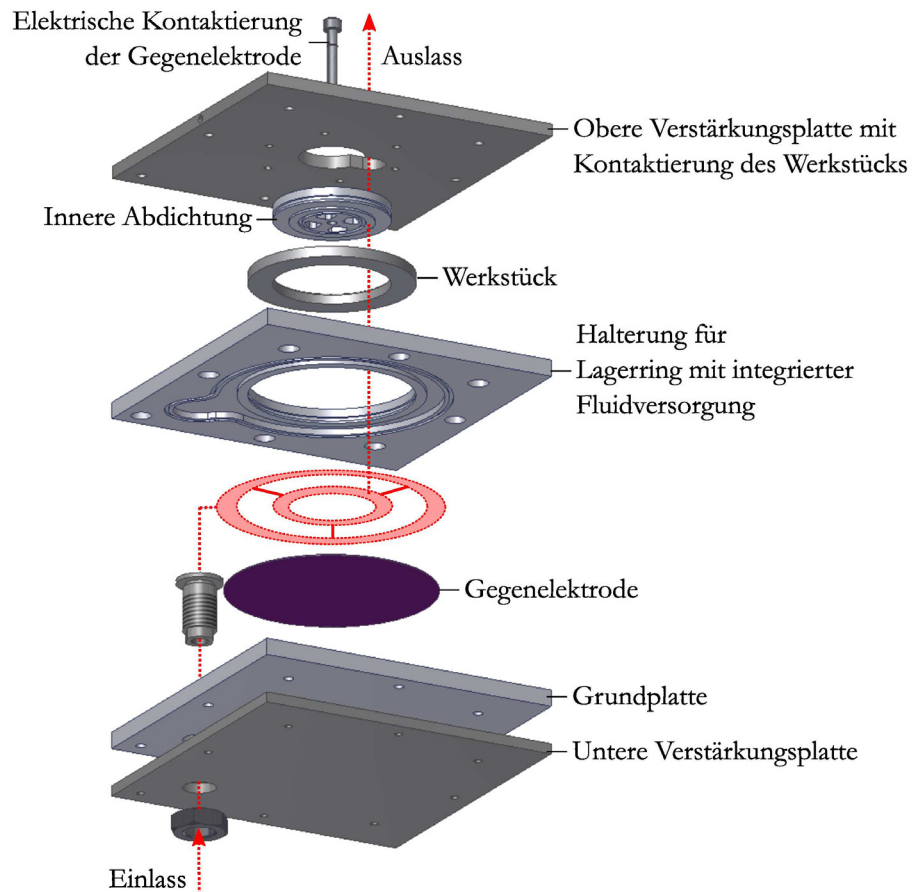


Abbildung 4.3. Aufbau der Halterung für planare Gegenelektroden zur Strukturierung von 81111-TV Axiallagern. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurden die O-Ringe und die Schrauben zum Zusammenbau nicht dargestellt. Die roten Linien zeigen den Verlauf des Elektrolyten; die dicken roten Linien zwischen den roten Kreisen deuten die fluidischen Kanäle in der Gegenelektrode an.

4. Strukturierung

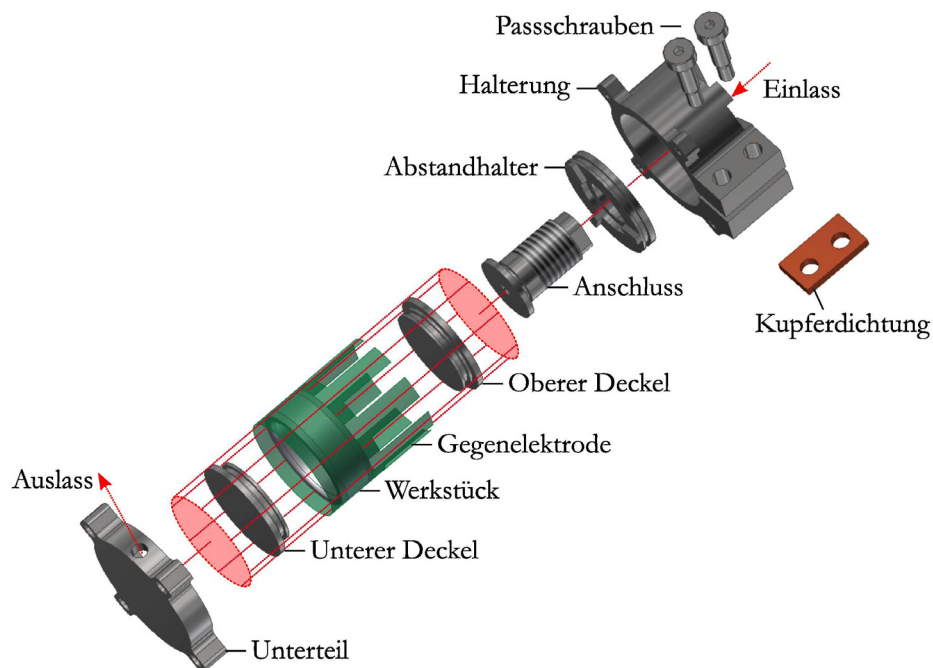


Abbildung 4.4. Aufbau der Halterung für flexible Gegenelektroden zur Strukturierung von Zylinderrollenlagern des Typs NU1006. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurden die O-Ringe und die Schrauben zum Zusammenbau nicht dargestellt. Der Elektrolyt fließt vom Einlass zwischen Gegenelektrode und Werkstück in den unteren Bereich, um aus dem Unterteil auszutreten. In einer Aufspannung können acht verschiedene Strukturen übertragen werden.

bildet) zusammengepresst. Der Lagerring wird hingegen über sechs Schrauben gegen die Gegenelektrode gepresst. Damit wird gewährleistet, dass Lagerring und Gegenelektrode zueinander ausgerichtet und fixiert sind, der Elektrolyt nicht austreten kann, der Lagerring auf die Gegenelektrode gepresst wird und durch den Druck nicht von ebendieser getrennt wird.

Über einen Hochdruckanschluss erfolgt die Versorgung mit dem Elektrolyten auf der Hochdruckseite außerhalb des Lagerrings. Die fluidischen Kanäle der Gegenelektrode leiten ihn auf die Innenseite in den Niederdruckbereich, wo er über einen Anschluss austreten kann. Die elektrische Kontaktierung der Gegenelektrode erfolgt in der Mitte der Aufnahme über eine modifizierte Schraube. Sie besitzt ein Loch für einen Bananenstecker und wird leicht gegen die Gegenelektrode geschraubt. Die Kontaktierung für das Werkstück befindet sich in einer der Verstärkungsplatten und wird über die Konstruktion sicher an den Lagerring geleitet.

4.1.1.2. Aufnahme für Radial-Lagerring

Als gekrümmte Substrate für die flexiblen Gegenelektroden werden die Innenringe von Radial-Zylinderrollenlagern des Typs NU1006 verwendet. Diese Lager lassen sich einfach auseinander nehmen und die Wälzkörper werden durch einen Käfig gehalten. Der Außendurchmesser der verwendeten Innenringe beträgt 36,5 mm. Die flexiblen Gegenelektroden beinhalten wiederum acht Strukturen, diese sind jedoch elektrisch unabhängig voneinander. In einer Aufspannung können also verschiedene Strukturen mit individuellen Parametern hergestellt werden.

Der Elektrolyt fließt bei diesem Aufbau außen an dem Lager vorbei (Abbildung 4.4). Damit kein Elektrolyt in den Lagerinnenraum gelangt, wird der Lagerring auf beiden Seiten durch Deckel verschlossen. In das Oberteil der Halterung wird zunächst die Gegenelektrode eingeführt. Die Kontaktfähnchen ragen oben heraus und die Gegenelektrode wird bis zum Anschlag in die Halterung geschoben. Ein Abstandshalter, der auch den Hochdruckanschluss aufnimmt, dichtet das Oberteil mit der Gegenelektrode nach außen ab. Der Lagerring mit den Deckeln wird nun in die Halterung geschoben, er stößt ebenfalls gegen den Anschlag, sodass Gegenelektrode und Lagerring axial zueinander ausgerichtet sind. Mit zwei Passschrauben und einem dichtenden Abstandshalter aus Kupfer wird das Oberteil seitlich geschlossen, sodass die Gegenelektrode gleichmäßig an dem Lagerring anliegt. Abschließend wird das Unterteil angeschraubt, aus dem der Elektrolyt austritt und das zusätzlich das Lager gegen den Anschlag drückt und dort fixiert.

Die elektrische Kontaktierung der Gegenelektrode erfolgt über die Kontaktfähnchen, die Kontaktierung des Lagerrings über das Gehäuse.

4.1.1.3. Aufnahme für mehrlagige Gegenelektroden auf planaren Substraten

Der mechanische Part für die mehrlagigen Gegenelektroden ist vergleichsweise einfach aufgebaut (Abbildung 4.5). Er besteht aus einem Kunststoff-Block, in den seitlich Sacklöcher gebohrt werden. In diese Löcher, versehen mit einem Gewinde, werden die Hochdruckanschlüsse geschraubt. Die Sacklöcher fungieren so als eine Art Common Rail, vergleichbar mit den Diesel-Einspritzsystemen. Von hier gehen einige kleinere Bohrungen in Richtung der Gegenelektrode ab, über die der fluidische Kanal mit Elektrolyt versorgt wird. Das System ist symmetrisch aufgebaut, sodass der Elektrolyt in beide Richtungen gepumpt werden kann.

Im Gegensatz zu den beiden vorherigen Halterungen erfolgt hier die Elektrolytzufuhr nicht seitlich, sondern von der Rückseite der Gegenelektrode. Das Werkstück wird wieder über eine Schraube, ähnlich wie bei den planaren Substraten, kontaktiert, die Gegenelektrode besitzt wie die flexiblen Substrate Kontaktfähnchen für die einzelnen Kontaktlagen.

Die Gegenelektrode wird mit doppelseitigem Klebeband auf dem Kunststoffblock fixiert und die Löcher für die Elektrolytversorgung werden gestanzt. Die gesamte Einheit wird anschließend auf dem Werkstück platziert, ausgerichtet und zusammengepresst.

4. Strukturierung

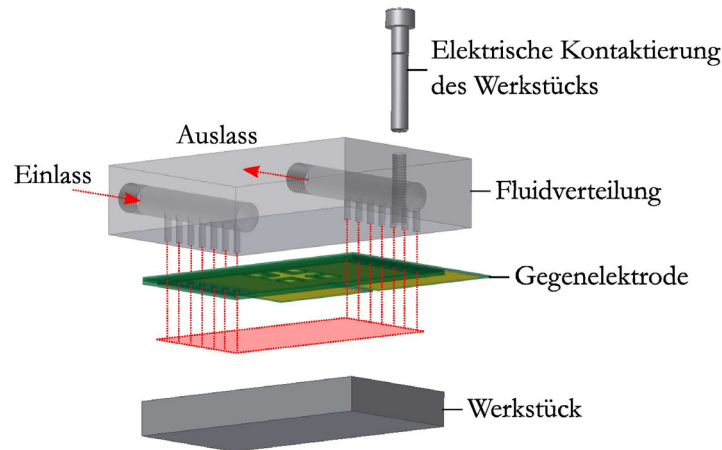


Abbildung 4.5. Aufbau der Halterung für mehrlagige Gegenelektroden. Die Halterung mit der Fluidverteilung wird mittels doppelseitigem Klebeband (nicht eingezeichnet) auf die Gegenelektrode geklebt und gemeinsam mit ihr auf das Werkstück gepresst. Das Werkstück wird über eine Schraube kontaktiert, von der Gegenelektrode führen Kontaktfähnchen nach außen. Die rot gepunkteten Linien zeigen die Elektrolytführung.

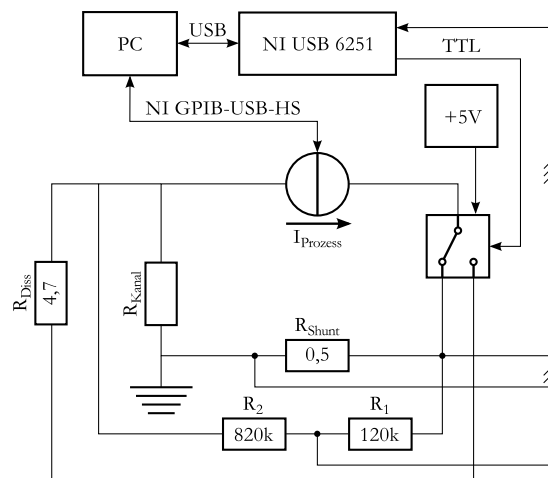


Abbildung 4.6. Schaltbild für die Prozesssteuerung. Der Strom wird über einen Wechselschalter zwischen dem Prozesszweig mit dem Kanal und einem Lastwiderstand R_{Diss} hin und her geschaltet, damit aus Sicht der langsamen Stromquelle ein konstanter Strom fließt. Die Steuerung des Prozesses übernimmt ein PC mit einem Labview-Programm.

4.1.2. Elektrische Ansteuerung

Die elektrische Ansteuerung für den Prozess ist schematisch in Abbildung 4.6 dargestellt. Das Herzstück der Steuerung bildet ein *Labview*-Programm, das auf einem PC läuft. Über eine GPIB-Schnittstelle wird die Stromquelle, eine *Gossen Metrawatt Konstanter SPP 240-80*, angesteuert. Die Stromquelle hat eine Leistung von 240 W und stellt einen maximalen Strom von 6 A und eine maximale Spannung von 80 V bereit. Die Einstellzeit liegt unter 4 ms bei diesem Gerät. Über die Rechnerschnittstelle lassen sich maximaler Strom und maximale Spannung, gewünschter Strom oder gewünschte Spannung und der Ausgang (ein/aus) einstellen.

Eine *NI USB 6251* Datenerfassungskarte nimmt die Prozessmesswerte für Strom und Spannung über den Kanal auf. Gleichzeitig stellt sie ein über das *Labview*-Programm einstellbares PWM-Signal für den Wechselschalter bereit. Dieser ist notwendig, weil die Stromquelle mit 4 ms Einstellzeit nicht schnell genug ist, um die benötigten kurzen Stromimpulse von 100 μ s Länge mit einer Frequenz von 100 Hz zu schalten. Diese Pulsdauer und -frequenz hat sich in Vorversuchen als optimal herausgestellt, damit die Pulsdauer möglichst kurz ist und keine Metallionen die Gegenelektrode erreichen können, sondern vorher mit dem Elektrolyten fortgespült werden (siehe Abschnitt A.5). Der Wechselschalter schaltet deshalb den Strom sehr schnell zwischen dem Prozesszweig und dem Lastwiderstand R_{Diss} hin und her, sodass aus Sicht der Stromquelle ein konstanter Strom fließt. R_{Diss} hat einen Wert von 4,7 Ω bei einer Leistung von 500 W. In Versuchen wurde der Widerstand über den Kanal experimentell bestimmt, er beträgt im Prozess etwa 5 Ω . Die meiste Zeit fließt der Strom über den Lastwiderstand, sodass er ausreichend bemessen sein muss. Weil maximal knapp 170 W fließen können, ist dies mit einigem Puffer gegeben.

Über einen Spannungsteiler aus R_1 und R_2 wird die Spannung über dem Kanal gemessen. In Reihe mit dem Kanal ist R_{Shunt} mit 0,5 Ω geschaltet, sodass über die hierüber gemessene Spannung auch der Strom in diesem Zweig aufgenommen wird. Beide Werte werden von der Datenerfassungskarte aufgenommen. Zusammen mit der Zeit kann aus dem gemessenen Strom die geflossene Ladung bestimmt werden. Weil die Ladung die Strukturtiefe bestimmt, stoppt das Programm automatisch den Prozess, sobald die gewünschte Ladungsmenge geflossen ist und schaltet die Stromquelle aus.

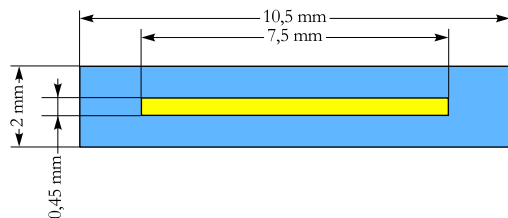
Eine Besonderheit gibt es bezüglich des Erdungspunktes in dieser Schaltung. Das Werkstück, also die Anode, ist der einzige gemeinsame Referenzpunkt für die Messungen und den Wechselschalter. Die Anode stellt daher das Nullpotential dar und die Kathode ist ihr gegenüber negativ gepolt. Das hat Auswirkungen auf den Wechselschalter, da dieser wiederum mit einem TTL-PWM-Signal der Datenerfassungskarte gesteuert und extern mit 5 V Betriebsspannung versorgt wird. In der Datenerfassungskarte liegen jedoch TTL-Ground und Mess-Ground auf demselben Potential. Zur Entkopplung werden deshalb P-Kanal MOSFETS zusammen mit Optokopplern im Wechselschalter verwendet. Das Schaltbild des Wechselschalters befindet sich im Anhang in Abschnitt A.6.

4.1.3. Elektroden designs

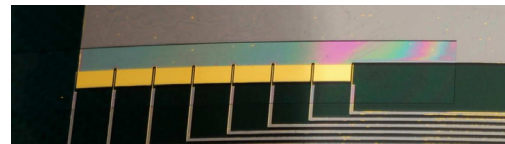
Es kommen verschiedene Elektroden designs zur Anwendung. Sie unterscheiden sich durch die Form der Gegenelektrode und die Form des fluidischen Kanals. Sowohl planare als auch flexible und mehrlagige Gegenelektroden werden verwendet. Zur Validierung der Simulations- und Berechnungsergebnisse werden entsprechende Designs verwendet. Aber auch komplexere Geometrien zur Auflösungsbestimmung und Sensorstrukturen werden hergestellt. Im Folgenden werden die einzelnen Geometrien und ihre Abmessungen detailliert beschrieben.

Typ 1 – Kanal mit konstantem Querschnitt

Die Abmessungen der Gegenelektroden vom Typ 1a und 1b sind identisch mit den Parametern, die in der FEM Simulation für die Analyse der Struktur tiefe verwendet werden (Abbildung 4.7a). Der Kanal ist jeweils 2 mm breit, 10,5 mm lang und 20 μm hoch. Typ 1b zeichnet sich durch eine unterbrochene Gegenelektrode aus; die Lücken sind 75 μm breit. Die darin angeordneten Messelektroden werden nicht verwendet (Abbildung 4.7b).



(a) Draufsicht der Gegenelektroden vom Typ 1a. Der fluidische Kanal ist blau hinterlegt, der Bereich der Gegenelektrode gelb.



(b) Umsetzung der Gegenelektroden vom Typ 1b. Die Unterbrechungen sind 75 μm breit.

Abbildung 4.7. Gegenelektroden vom Typ 1 – Kanal mit konstantem Querschnitt.

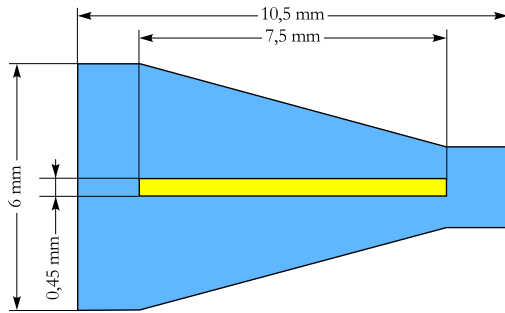
Typ 2 – Kanal mit verengendem Querschnitt

Zur Untersuchung des Einflusses der Kanalgeometrie auf das Strukturprofil werden sowohl Elektroden mit sich verengendem Querschnitt als auch mit sich erweiterndem Querschnitt verwendet. Die Gegenelektrode mit sich verengendem Querschnitt ist in Abbildung 4.8a dargestellt. Der Kanal ist am Anfang (links) zunächst 6 mm breit und verjüngt sich im Bereich der Gegenelektrode auf 2 mm. Die Gegenelektrode ist wiederum 450 μm breit und 7,5 mm lang. Der Unterschied zwischen Typ a und Typ b besteht in 75 μm breiten Unterbrechungen in der Gegenelektrode.

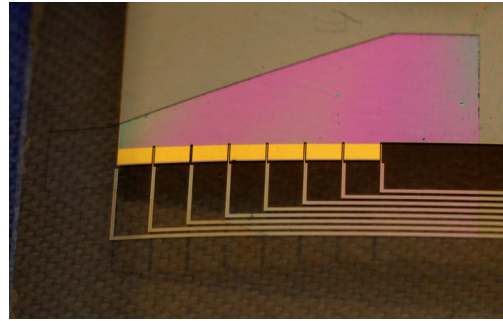
Typ 3 – Kanal mit erweiterndem Querschnitt

Typ 3 der Elektroden ist identisch zu Typ 2 (Abbildung 4.8a) aufgebaut mit dem Unterschied, dass der Kanal von rechts nach links statt von links nach rechts von dem

4. Strukturierung



(a) Draufsicht der Gegenelektroden vom Typ 2a. Der fluidische Kanal ist blau hinterlegt, der Bereich der Gegenelektrode gelb.



(b) Umsetzung der Gegenelektroden vom Typ 2b. Die Unterbrechungen sind $75\text{ }\mu\text{m}$ breit.

Abbildung 4.8. Gegenelektroden vom Typ 2 bzw. 3 – Kanal mit sich verengendem oder erweiterndem Querschnitt.

Elektrolyten durchflossen wird.

Typ 4 – Schachbrett

Die Schachbrett-Struktur lässt eine relativ einfache Überprüfung der erreichbaren Strukturauflösung zu. Weil die einzelnen Quadrate Spitze auf Spitze stehen, ist auch die laterale Ausdehnung der Struktur in Folge der Streuung des Feldes gut erkennbar. Die Rechtecke haben $500\text{ }\mu\text{m}$, $250\text{ }\mu\text{m}$, $125\text{ }\mu\text{m}$, $50\text{ }\mu\text{m}$ und $25\text{ }\mu\text{m}$ Kantenlänge. Die Struktur ist gespiegelt angeordnet, sodass die großen Rechtecke direkt am Anfang und direkt am Ende des fluidischen Kanals liegen.

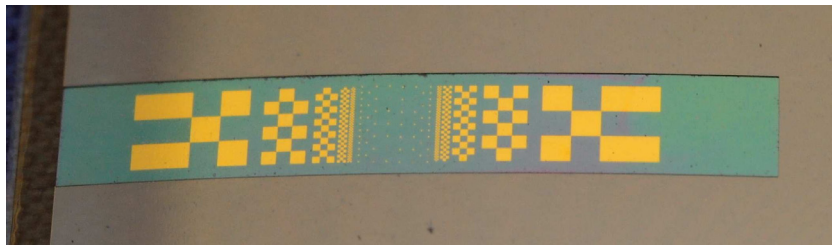


Abbildung 4.9. Gegenelektroden vom Typ 4 – Schachbrettstruktur auf einer flexiblen Gegenelektrode.

Typ 5 – Dehnungsmessstreifen klein

Diese Struktur stellt einen einfachen Dehnungsmessstreifen dar. Die Leiterbahn im sensitiven Bereich ist $25\text{ }\mu\text{m}$ breit, der Abstand zwischen den Leiterbahnen beträgt $200\text{ }\mu\text{m}$.

4. Strukturierung



Abbildung 4.10. Gegenelektroden vom Typ 5 – Einfache DMS-Struktur auf einer flexiblen Gegenelektrode.

Typ 6 – Dehnungsmessstreifen groß

Der große Dehnungsmessstreifen zeichnet sich durch seine besonders großen lateralen Abmessungen aus. Das verwendete Substrat ist 40 mm x 80 mm groß, die strukturierte Fläche 30,74 mm x 58,1 mm. Weil die zu strukturierende Schicht lediglich 250 nm dick ist, wurde die Gegenelektrode zweilagig ausgeführt. Im ersten Schritt wird so das innere der Struktur entfernt, um sicherzustellen, dass zwischen den einzelnen Schlaufen des Dehnungsmessstreifens keine Rückstände verbleiben. Diese würden Kurzschlüsse innerhalb der Struktur verursachen. Der zweite Prozessschritt sorgt für die elektrische Abtrennung des Dehnungsmessstreifens von der umgebenden Metallisierung.

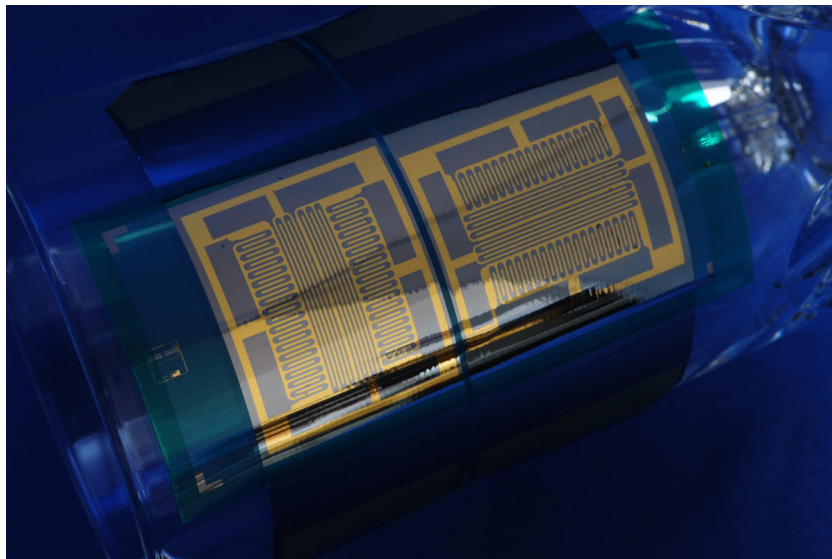


Abbildung 4.11. Gegenelektroden vom Typ 5 – DMS-Struktur auf einer mehrlagigen, flexiblen Gegenelektrode.

4.2. Ergebnisse

Abbildung 4.12 zeigt exemplarisch das Strukturierungsergebnis eines mit einer Gegenelektrode vom Typ 1a (gerader Kanal, durchgehende Gegenelektrode) hergestellten Grabens auf dem

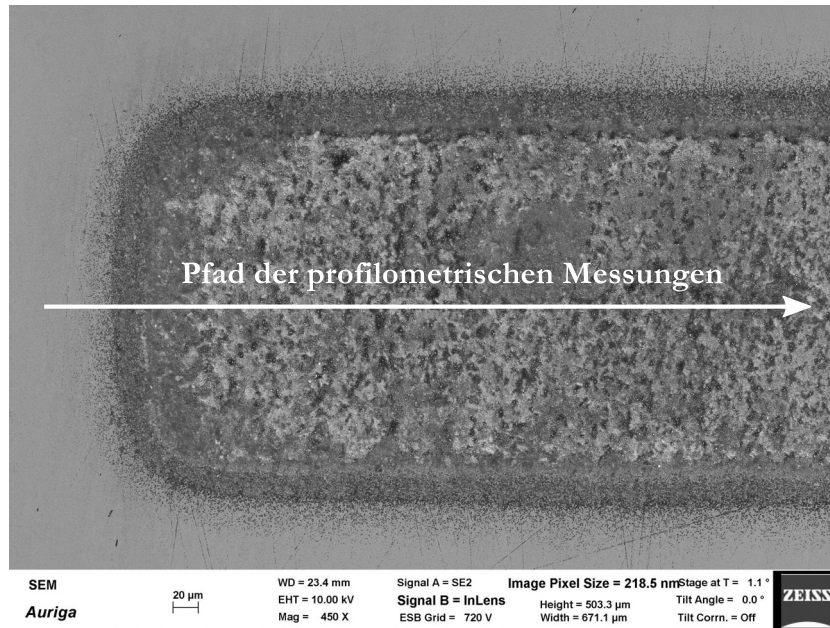


Abbildung 4.12. REM-Aufnahme vom Anfangsbereich eines strukturierten Grabens. Zudem wurde der Pfad der profilometrischen Messungen (Abbildungen 4.14 bis 4.16) eingezeichnet.

Lagerring eines Axial-Zylinderrollenlagers. Es lassen sich vier Bereiche unterschiedlicher Oberflächenbeschaffenheiten unterscheiden.

Von außen nach innen ist zunächst die unstrukturierte, zuvor polierte Fläche des Lagerrings erkennbar. Die Rautiefe R_a ist hier geringer als 20 nm. Es folgt ein etwa 20 μm breiter Streifen, in dem punktwise Material abgetragen wurde. Der Materialabtrag nimmt von außen nach innen zu, jedoch reicht die elektrische Feldstärke nicht aus, um ganzflächig Material zu entfernen. An diesen Streubereich schließt sich die Flanke des Grabens an (siehe auch Abbildung 4.13). Die Flanke erscheint im Gegensatz zu dem Streubereich glatter; ein Rauwert konnte an dieser Flanke jedoch nicht bestimmt werden. Schlussendlich ist der Grund des Grabens zu sehen, der über die gesamte Fläche der Gegenelektrode abgetragen wurde. Die Rautiefe R_a liegt hier bei 540 nm und ist damit 8 % größer als bei einem unpolierten Lagerring ($R_a = 500 \text{ nm}$).

4.2.1. Strukturprofil

Im Folgenden wird der Einfluss der Metallionenkonzentration auf das Strukturergebnis untersucht. Gegenelektroden der Typen 1a, 2a und 3a werden verwendet, um den Einfluss der Kanalgeometrie auf das Grabenprofil zu untersuchen. Als Substrat kommt ein Lagerring eines Axial-Zylinderrollenlagers zum Einsatz. Die Gräben werden mit einem Ambios XP-200 Profilometer der Länge nach vermessen (vgl. Pfad in Abbildung 4.12) und die Ergebnisse werden mit der entsprechenden Berechnung des analytischen Modells verglichen. Bei dem geraden Kanal wird zudem das Ergebnis des FEM-Modells gegen-

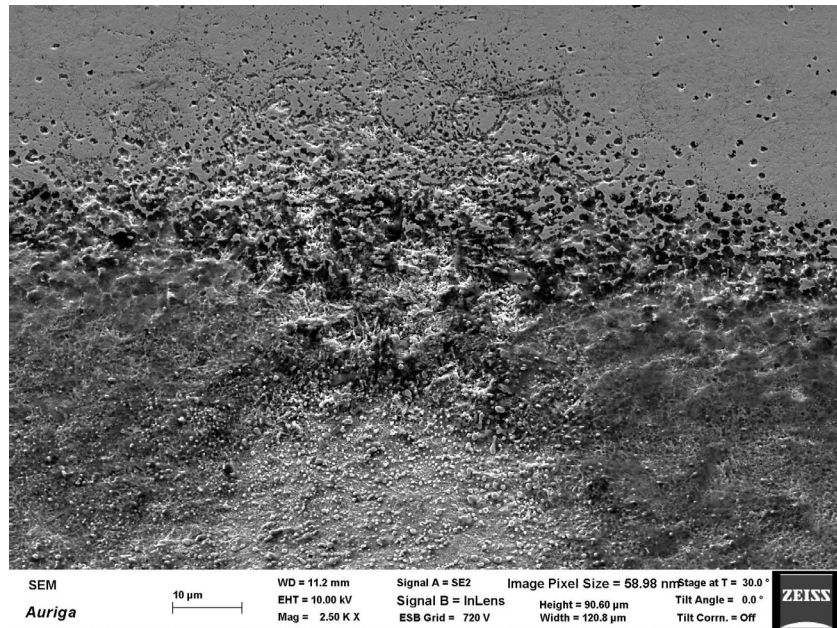


Abbildung 4.13. Detailaufnahme des Übergangs vom Grund des Grabens zur ursprünglichen Oberfläche.

übergestellt, um auch hier einen Vergleich zu ermöglichen. Da die FEM-Simulation nicht in der Lage ist, einen nicht konstanten Kanalquerschnitt zu berücksichtigen, entfällt sie bei den zulaufenden und sich erweiternden Kanälen.

Die Strukturen werden mit planaren Gegenelektroden auf ebenfalls planaren Oberflächen hergestellt. Durch eine Ungenauigkeit bei der Fertigung der Strukturierungsaufnahme (siehe Abbildung 4.3) kann sich der zu strukturierende Lagerring gegenüber der Gegenelektrode verschieben. Das hat zur Folge, dass sich die Wälzlageroberfläche bis zu $40\text{ }\mu\text{m}$ von der Gegenelektrode entfernen kann und damit die Kanalhöhe nicht mehr $20\text{ }\mu\text{m}$, sondern effektiv $60\text{ }\mu\text{m}$ beträgt. Dadurch sinkt auch der notwendige Druck zum Durchströmen des Kanals. Der Elektrolyt kann ungehindert auch neben dem Kanal von einer Seite des Lagerrings auf die andere fließen, sodass die Strömungsgeschwindigkeit stark sinkt. Diese Faktoren wurden bei den folgenden Betrachtungen berücksichtigt.

Gerader Kanal

Abbildung 4.14 zeigt die profilometrische Messung eines mit einer Gegenelektrode vom Typ 1a hergestellten Grabens zusammen mit dem Ergebnis des analytischen Modells. Der Elektrolyt floss bei der Strukturierung von links nach rechts. Der Kanal ist zu Beginn knapp $4\text{ }\mu\text{m}$ tief. Im Verlauf des hergestellten Grabens steigt die Tiefe des Grabens auf etwa $6,5\text{ }\mu\text{m}$ an, wobei sich der größte Anteil der Grabenvertiefung im hinteren Drittel des Kanals befindet.

Im Vergleich mit dem Ergebnis der analytischen Berechnung zeigt sich, dass beide Kurven relativ nah beieinander liegen. Im mittleren Bereich, etwa zwischen 2 mm und

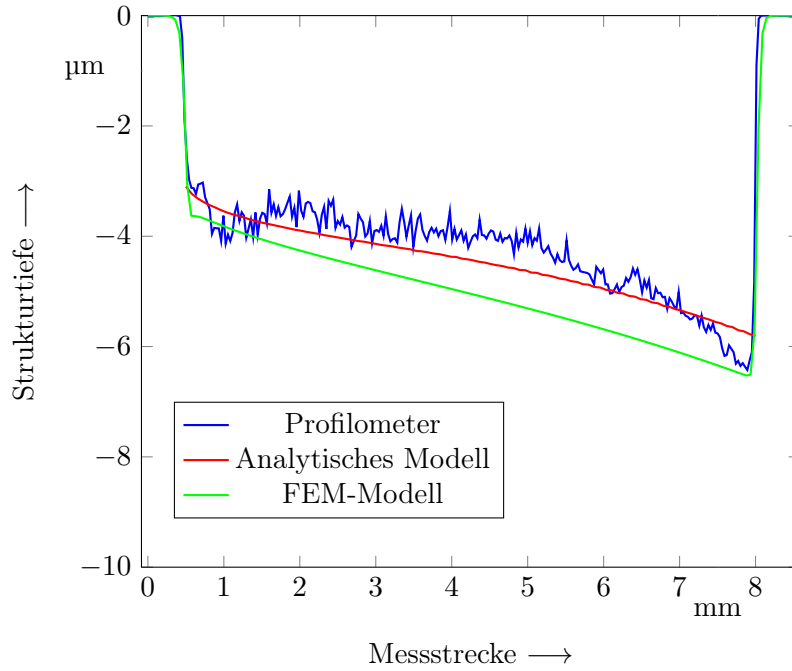


Abbildung 4.14. Profilometrische Messung des Grabenprofils und analytische Berechnung einer Strukturierung mit einer Gegenelektrode vom Typ 1a - Kanal mit konstantem Querschnitt und durchgehender Gegenelektrode. Kanalhöhe $h_{Kanal} = 60 \mu\text{m}$, Stromdichte $J = 100 \text{ A/cm}^2$, gepulst mit 100 Hz und einer Einschaltzeit von 10 %, Druck $p_{in} = 0,005 \text{ bar}$, Ladungsmenge 0,4 As.

6 mm auf der x-Achse, ist der reale Abtrag etwas niedriger als der berechnete, während der reale Abtrag auf dem letzten Millimeter etwa $0,5 \mu\text{m}$ höher ist. Die Abweichungen lassen sich damit erklären, dass es innerhalb der Strukturierungsaufnahme durch den Druck des Elektrolyten zu mechanischen Verformungen kommen kann und damit die realen, fluidischen Eigenschaften von den angenommenen Eigenschaften abweichen können. Hinzu kommt, dass die analytische Berechnung nicht die Änderung der Kanalgeometrie berücksichtigt. Diese liegt bei einer Strukturtiefe von $6 \mu\text{m}$ immerhin bei 10 % der ursprünglichen Kanalhöhe. Weil die Höhe des Kanals mit der dritten Potenz in den Volumenstrom eingeht (vgl. Gleichung 2.23 auf Seite 49), wird es bei zunehmender Strukturtiefe immer höhere Abweichungen geben.

Beim Vergleich des Strukturierungsergebnisses mit dem Ergebnis der FEM-Simulation sagt FEM-Modell zwar die Anfangs- und Endtiefe der Struktur korrekt vorher, dazwischen wird aber durchgängig eine zu große Strukturtiefe berechnet. Die Ausprägung des im Verlauf der Struktur abfallenden Profils ist im Vergleich zu dem der profilometrischen Messung als auch dem des analytischen Modells weniger stark ausgeprägt. Bei dem FEM-Modell werden zwar die entstehenden Doppelschichten und die Veränderung der Kanalgeometrie berücksichtigt (siehe Kapitel 2.1.5.1), offensichtlich sind die abschirmenden Effekte in der Realität aber größer als durch das Modell vorhergesagt. Das analytische Modell ist

hier nur besser, weil es die Geometrieänderungen nicht berücksichtigt und daher von einer höheren Elektrolytgeschwindigkeit und damit niedrigeren Metallionenkonzentration ausgeht.

Verengender Kanal

In Abbildung 4.15 sind das Ergebnis der analytischen Berechnung und die profilometrische Vermessung einer Strukturierung mit einer Gegenelektrode vom Typ 2a gezeigt. Bei dieser Gegenelektrode verengt sich der fluidische Kanal von 6 mm am Anfang des Kanals auf 2 mm am Ende des Kanals. Das Ziel dieser Kanalgeometrie ist es, den Elektrolyten im Verlaufe des Kanals zu beschleunigen und damit die Metallionenkonzentration im Kanal konstant zu halten.

In der praktischen Umsetzung zeigt sich, dass dies in der ersten Hälfte des Kanals funktioniert und die Strukturtiefe von anfangs $3,5\text{ }\mu\text{m}$ um $0,25\text{ }\mu\text{m}$ abfällt (vgl. dazu die stetig ansteigende Strukturtiefe in Abbildung 4.14 in diesem Bereich). Danach, in der zweiten Kanalhälfte, steigt die Tiefe der Struktur auf etwa $6\text{ }\mu\text{m}$.

Es zeigt sich, dass das analytische hier Modell nicht in der Lage ist, eine korrekte Vorhersage des Strukturprofils zu treffen. Wenn auch die anfängliche Strukturtiefe und die Tiefe am Ende des Kanals korrekt berechnet werden, so weicht das berechnete Profil dazwischen stark von dem realen Profil ab. Die Ursache liegt in diesem Fall darin begründet, dass das Modell davon ausgeht, dass allein die Verteilung der Metallionen die Strukturtiefe beeinflusst und vernachlässigt dabei die sich bildenden Doppelschichten. Weil dieser Kanal im Vergleich zum Kanal vom Typ 1 am Einlass jedoch drei mal breiter als am Auslass ist, ist auch die anfängliche Geschwindigkeit des Elektrolyten größer. Hinzu kommt, dass am Anfang des Kanals noch keine oder nur wenige Metallionen gelöst wurden. Dadurch ist die Metallionenkonzentration im Vergleich zum geraden Kanal niedriger und der Abtrag ist nicht mehr proportional zur Leitfähigkeit des Elektrolyten, sondern wird durch die sich bildenden Doppelschichten abgeschwächt. Ab der Mitte des Kanals übersteigt die Metallionenkonzentration hingegen eine kritische Schwelle, die Doppelschichten verlieren ihren dominierenden Einfluss und die Abtragsrate steigt massiv an.

Ein Vergleich mit der FEM-Simulation findet nicht statt, weil dieses Modell nicht die Änderung der Kanalbreite abbilden kann.

Erweiternder Kanal

Abbildung 4.16 zeigt das analytisch berechnete und das reale Profil einer Strukturierung, die mit Gegenelektroden vom Typ 3a durchgeführt wurden. Bei diesem Elektrodentyp erweitert sich der Kanal von 2 mm auf 6 mm. Das hat zur Folge, dass der Elektrolyt im Verlauf des Kanals abgebremst wird und sich demnach die Metallionenkonzentration im Verlauf des Kanals erhöht.

In der profilometrischen Messung zeigt sich, dass die Profiltiefe sich bis $x = 6\text{ mm}$ ähnlich wie der Kanal vom Typ 1 verhält (vgl. Abbildung 4.14). Auf den letzten zwei Millimetern steigt die Profiltiefe hingegen auf etwa $8\text{ }\mu\text{m}$ an und ist damit $2\text{ }\mu\text{m}$ tiefer als die Struktur mit geradem Kanal.

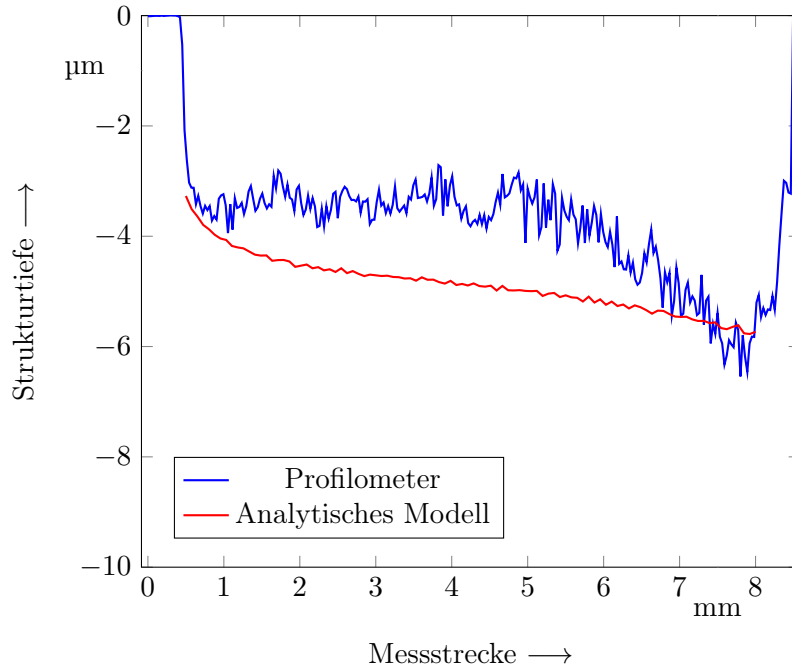


Abbildung 4.15. Profilometrische Messung des Grabenprofils und analytische Berechnung einer Strukturierung mit einer Gegenelektrode vom Typ 2a - Kanal mit verengendem Querschnitt und durchgehender Gegenelektrode. Kanalhöhe $h_{Kanal} = 60 \mu\text{m}$, Stromdichte $J = 100 \text{ A/cm}^2$, gepulst mit 100 Hz und einer Einschaltzeit von 10 %, Druck $p_{in} = 0,005 \text{ bar}$, Ladungsmenge 0,4 As.

Die analytische Berechnung zeigt bis $x = 6 \text{ mm}$ eine hohe Übereinstimmung mit der realen Struktur. Auf den letzten zwei Millimetern weichen beide Ergebnisse jedoch stark voneinander ab. Hier kommt das Modell aus dem gleichen Grund wie bei der Gegenelektrode vom Typ 1 seine Grenzen, weil es nicht die sich ändernde Strukturtiefe berücksichtigt und damit die reale Metallionenkonzentration höher ist als vom Modell berechnet.

Wie auch bei dem Kanal mit dem sich verengendem Kanal ist hier keine FEM-Simulation möglich.

4.2.2. Auflösungsvermögen

In diesem Abschnitt wird das Auflösungsvermögen des Prozesses untersucht. Dazu kommen flexible Gegenelektroden vom Typ 1b (gerader Kanal) und 2b (verengender Kanal) zum Einsatz. Gegenelektroden vom Typ 3b werden nicht verwendet, weil die zum Ende des Kanals stark zunehmende Profiltiefe der Struktur unerwünscht ist.

Als Substrat dient der Innenlagerring eines radialen Zylinderrollenlagers mit einem Außendurchmesser von 36,5 mm. Der Aufbau der Halterung für die Strukturierung wurde dahingehend verbessert, dass die Abweichungen der Kanalhöhe durch mechanische Verformungen minimiert wird (vgl. Abbildung 4.4).

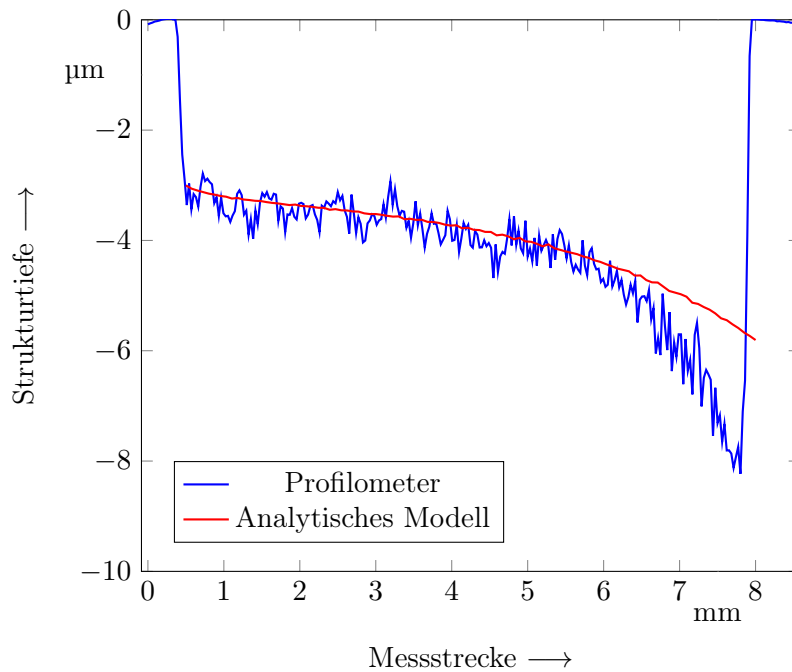


Abbildung 4.16. Profilometrische Messung des Grabenprofils und analytische Berechnung einer Strukturierung mit einer Gegenelektrode vom Typ 3a - Kanal mit erweiterndem Querschnitt und durchgehender Gegenelektrode. Kanalhöhe $h_{Kanal} = 60 \mu\text{m}$, Stromdichte $J = 100 \text{ A/cm}^2$, gepulst mit 100 Hz und einer Einschaltzeit von 10 %, Druck $p_{in} = 0,005 \text{ bar}$, Ladungsmenge 0,4 As.



Abbildung 4.17. Mikroskopische Aufnahme einer mit einer Gegenelektrode vom Typ 1b hergestellten Struktur zur Bestimmung des Auflösungsvermögens. Die verbleibenden Stege im Verlaufe des Kanals sind im Elektrodendesign $75 \mu\text{m}$ breit.

Ein Vergleich mit dem analytischen Modell ist an dieser Stelle nicht möglich, weil dieses Modell lediglich für durchgehende, unstrukturierte Gegenelektroden Gültigkeit besitzt. Daher findet nur ein Vergleich der Struktur, die mit der Gegenelektrode vom Typ 1b hergestellt wurde, mit dem FEM-Modell statt.

Abbildung 4.17 zeigt eine der hergestellten Strukturen. Der Elektrolyt strömte bei der Herstellung von links nach rechts. Die profilometrischen Messungen wurden hier ebenfalls, analog zu dem Pfad in Abbildung 4.12, von links nach rechts durchgeführt.

Gerader Kanal

Abbildung 4.18 zeigt das Strukturierungsergebnis einer Gegenelektrode vom Typ 1b (gerader Kanal, unterbrochene Gegenelektrode) zusammen mit der entsprechenden Berechnung des FEM-Modells. Die übertragene Ladungsmenge beträgt 2 As.

Die Tiefe der mit dem Profilometer vermessenen, realen Struktur steigt in den ersten drei „Kammern“ nahezu linear von $16,5\text{ }\mu\text{m}$ auf $19,2\text{ }\mu\text{m}$ an. Es zeigt sich aber, dass die rechte untere Ecke der dritten Kammer nicht so ausgeprägt ist, wie bei den ersten beiden Kammern. Dieser Effekt ist bei den folgenden vier Kammern jeweils stark ausgeprägt; die Böden der Strukturen sind stark abgerundet und die Strukturtiefe nimmt nicht in gleichem Maße wie am Anfang zu. Durch die Tiefe der Struktur nehmen die Streueffekte zwischen den Flanken der einzelnen Kammern zu. Damit ist das elektrische Feld am Boden der Kammer geschwächt und es wird vermehrt Material von den Flanken der verbleibenden Strukturen abgetragen. Es kann aber auch zu Verwirbelungen des Elektrolyten kommen, die lokal für eine niedrigere Metallionenkonzentration und damit niedrigere Abtragsrate sorgen.

Die Strukturauflösung nimmt hingegen im Verlauf des Kanals zu. Während der erste Hügel etwa $5,9\text{ }\mu\text{m}$ unterhalb des ursprünglichen Niveaus liegt, liegen die letzten beiden Hügel (5 und 6) nur noch $0,5\text{ }\mu\text{m}$ bzw. $0,5\text{ }\mu\text{m}$ darunter. Diese Erhöhung der Strukturauflösung lässt sich wiederum mit der erhöhten Metallionenkonzentration in diesem Bereich erklären. Eine hohe Metallionenkonzentration wirkt wie eine Fokussierung des elektrischen Feldes und Streueffekte nehmen ab. Erst ab einer bestimmten Tiefe wirken die geometrischen Bedingungen dieser Fokussierung entgegen und die Abrundungen am Grund der Struktur entstehen.

Das FEM-Modell zeigt in den ersten drei Kammern eine sehr gute Übereinstimmung mit den Messungen. Lediglich die Abnahme der Spitzen vermag es nicht in dem Maße vorherzusagen, wie sie real auftritt. Immerhin ist eine leichte Abnahme der Tiefen der Spitzen zu beobachten. In den letzten vier Kammern stimmt das FEM-Modell nicht mit den Abrundungen der realen Struktur auf deren Grund überein. Dies legt die Vermutung nahe, dass es hier zu Effekten kommt, die das Modell nicht abbilden kann. So ist es beispielsweise möglich, dass durch die entstehende Kanalgeometrie der Elektrolyt und damit die Metallionenkonzentration nicht laminar fließen, sondern Verwirbelungen entstehen. Das Modell geht jedoch von einer weiterhin laminaren Strömung aus.

Im Vergleich mit dem Ergebnis der Gegenelektrode mit geradem Kanal und durchgehender Gegenelektrode fällt auf, dass das FEM-Modell bei der strukturierten Gegenelektrode eine bessere Vorhersage der Strukturgeometrie treffen kann (vgl. Abbildung 4.14). Die

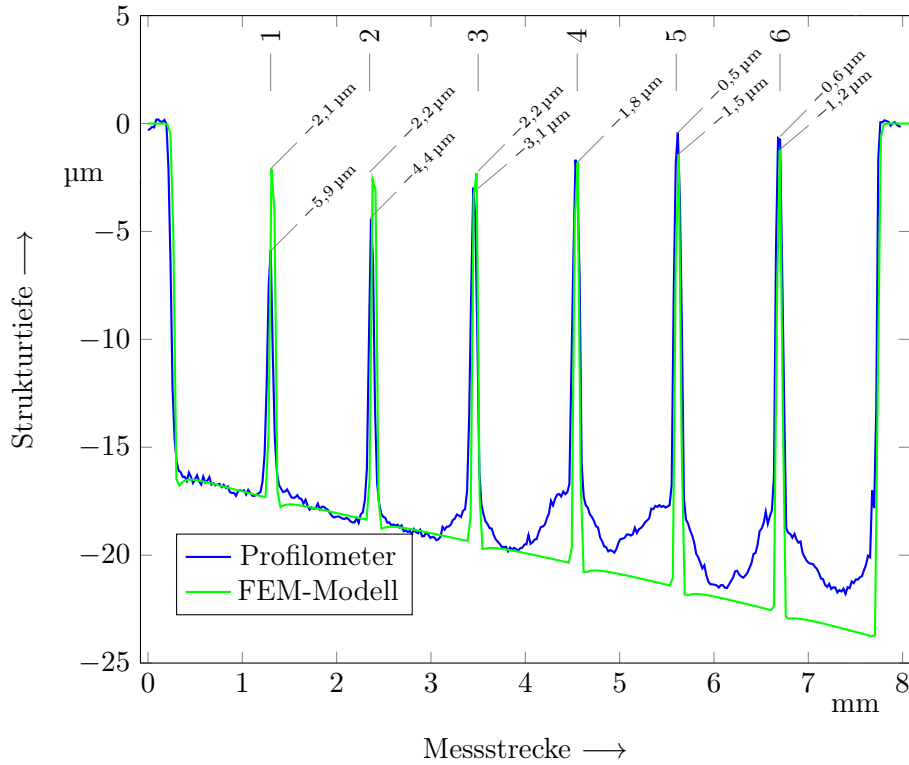


Abbildung 4.18. Profilometrische Messung des Grabenprofils und Ergebnis des FEM-Modells einer Strukturierung mit einer Gegenelektrode vom Typ 1b - Kanal mit konstantem Querschnitt und unterbrochener Gegenelektrode. Kanalhöhe $h_{Kanal} = 20\text{ }\mu\text{m}$, Stromdichte $J = 100\text{ A/cm}^2$, gepulst mit 100 Hz und einer Einschaltzeit von 10 %, Druck $p_{in} = 0,05\text{ bar}$, Ladungsmenge 2,0 As.

Struktur wirkt demnach wie eine Bremse für die sich bildenden Metallionen und Doppelschichten, sodass die Bildung der Doppelschichten verzögert oder sogar verhindert wird. Die Strukturierung ist, zumindest in den ersten drei Kammern, stark von der Metallionenkonzentration im Elektrolytkanal abhängig.

Verengender Kanal

Um den Einfluss der kontinuierlichen Strukturvertiefung im Laufe des Kanals zu minimieren, wurde in Abbildung 4.19 eine Gegenelektrode mit einem sich verengendem Kanal (Typ 2b) verwendet. Zudem wurde die Ladungsmenge auf 1 As reduziert, um damit nur halb so tiefe Strukturen zu erzeugen. So werden die Abrundungen an den Böden der letzten vier Kammern, wie sie in Abbildung 4.18 sichtbar sind, vermieden.

Die Vermessung mit dem Profilometer zeigt, dass die Zunahme der Strukturtiefe zwar nicht vollständig vermieden, aber signifikant vermindert werden kann. Als Vergleich ist das mit dem FEM-Modell berechnete Profil, welches sich mit den gleichen Prozessparametern und einer Gegenelektrode mit *geradem* Kanal ergeben hätte, in der Abbildung

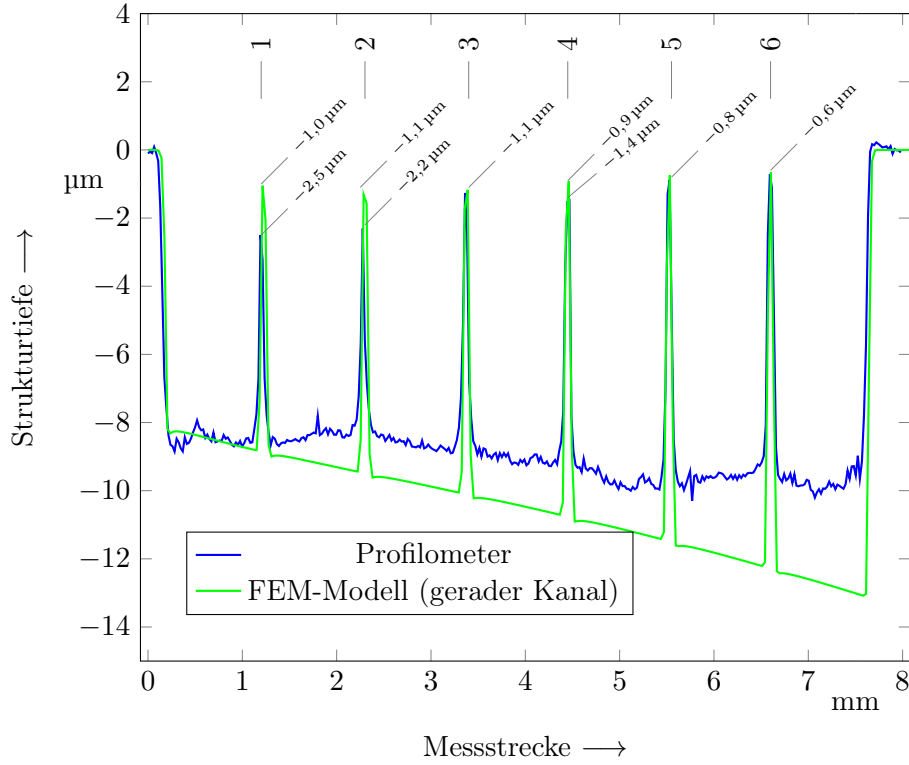


Abbildung 4.19. Profilometrische Messung des Grabenprofils einer Strukturierung mit einer Gegenelektrode vom Typ 2b - Kanal mit verengendem Querschnitt und unterbrochener Gegenelektrode. Als Vergleich ist das mit dem FEM-Modell simulierte Ergebnis eines geraden Kanals eingezeichnet. Kanalhöhe $h_{Kanal} = 20 \mu\text{m}$, Stromdichte $J = 100 \text{ A/cm}^2$, gepulst mit 100 Hz und einer Einschaltzeit von 10 %, Druck $p_{in} = 0,05 \text{ bar}$, Ladungsmenge 1,0 As.

eingezeichnet. Dieses Ergebnis wird als Vergleich herangezogen, weil das FEM-Modell nicht die Änderung der Kanalbreite abbilden kann. Die Betrachtungen im vorhergehenden Abschnitt haben gezeigt, dass das FEM Modell recht gut das entstehende Strukturprofil vorhersagen kann. Weil hier nur halb so tief strukturiert wird und die Abweichungen der realen Struktur von dem Modell bei höheren Strukturturen immer größer werden, ist davon auszugehen, dass in diesem Fall das FEM-Modell sehr nahe an dem realen Ergebnis liegt. Die reale Strukturtiefe nimmt lediglich um $1,5 \mu\text{m}$ von $8,5 \mu\text{m}$ auf $10 \mu\text{m}$ zu, während sie beim geraden Kanal auf etwa $13 \mu\text{m}$ zugenommen hätte.

Die Ecken auf dem Grund der Kammern sind im Vergleich mit Abbildung 4.18 durchgängig stärker ausgeprägt. Der starke Anstieg der Profiltiefe zum Ende des Kanals, wie er bei der durchgängigen Gegenelektrode mit zulaufendem Kanal auftritt (vgl. Abbildung 4.15), ist hier, bei der unterbrochenen Gegenelektrode, nicht zu beobachten, obwohl die Strukturtiefe mehr als doppelt so groß ist. Die Ausbildung des Zusammenspiels von Doppelschichten und Leitfähigkeitserhöhung im fluidischen Kanal scheint sich auf die einzelnen Kammern zu konzentrieren und hat nur einen relativ geringen Einfluss auf die

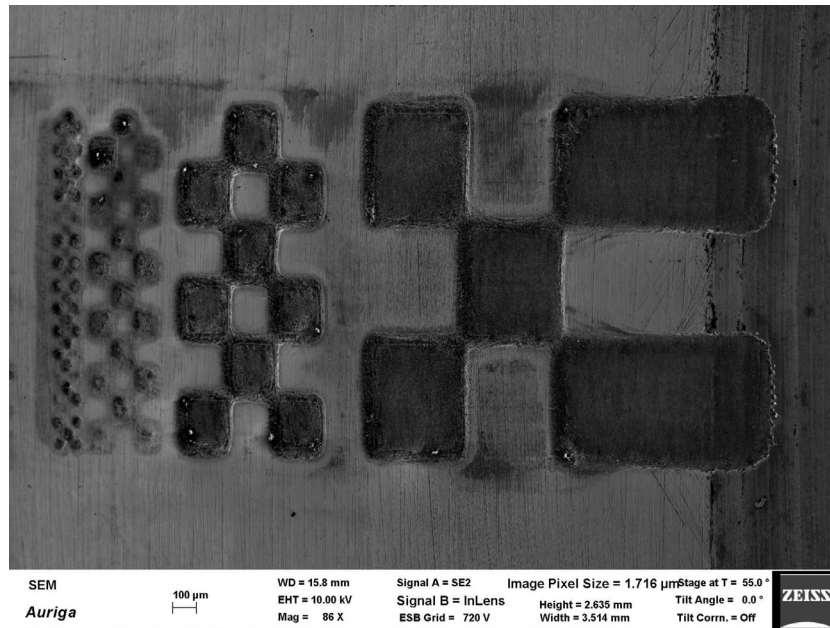


Abbildung 4.20. REM-Aufnahme einer strukturierten Schachbrettstruktur. Die Abbildung zeigt die am Ende des fluidischen Kanals liegenden Strukturen.

folgenden Strukturen.

Auch hier nimmt die Strukturauflösung von links nach rechts zu. Während der erste Hügel noch 2,5 μm unterhalb der ursprünglichen Oberfläche liegt, wird der letzte Hügel nur um 0,6 μm verkürzt.

Schachbrettstruktur

Die Schachbrettstruktur der Gegenelektrode vom Typ 4 (siehe Abbildung 4.9) wird verwendet, um den Einfluss der Strukturtiefe auf das Auflösungsvermögen zu untersuchen. Abbildung 4.20 zeigt die stromabwärts liegende Hälfte einer solchen Struktur. Als Substrate kamen wieder die gekrümmten Substrate (Wälzlagering) mit 36,5 mm Außendurchmesser zum Einsatz. Es wurden für die Untersuchungen zwei Strukturen hergestellt, eine mit 10 As und eine mit 5 As übertragener Ladungsmenge. Anschließend wurde die Breite der Strukturen wie in Abbildung 4.21 vermessen und die Mittelwerte gebildet. Dies geschieht sowohl für die Strukturen am Anfang des fluidischen Kanals (Positionen 1-3) als auch an bei den Strukturen, die stromabwärts liegen (Positionen 4-6). Die Strukturen mit 50 μm und 25 μm Kantenlänge werden nicht betrachtet, weil sie bei den verwendeten Parametern nicht mehr klar getrennt aufgelöst werden. Visuell ist der Unterschied zwischen den Strukturen am Anfang und am Ende des Kanals stark ausgeprägt, was gut im Vergleich der Abbildungen 4.21 (Ende des Kanals) und 4.22 (Anfang des Kanals) zu sehen ist. Während die Strukturen am Ende des Kanals sehr scharfe Kanten haben, sind die Kanten am Anfang des Kanals stärker abgerundet.

Tabelle 4.1 zeigt für die einzelnen Positionen die Mittelwerte der Messergebnisse (Spalte

4. Strukturierung

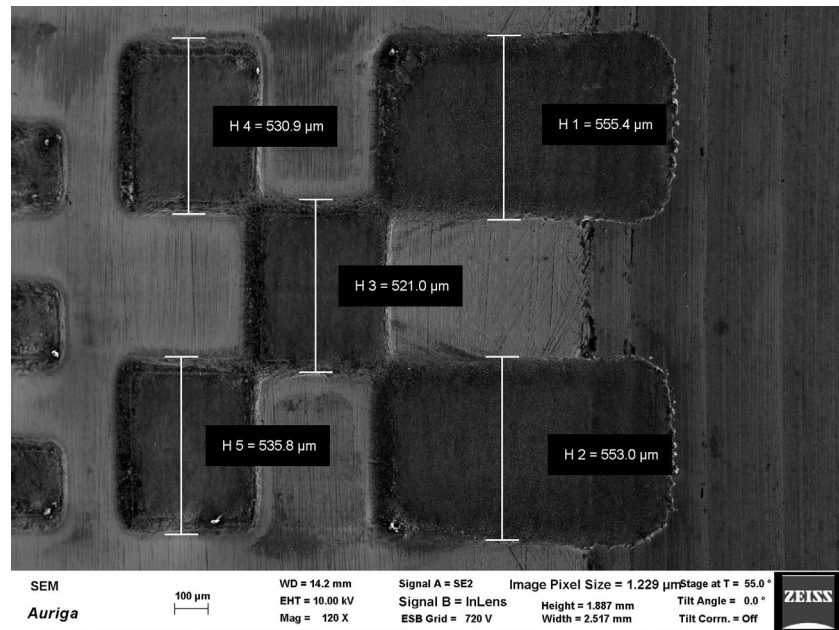


Abbildung 4.21. Vermessung einer strukturierten Schachbrettstruktur. Die Breite der Strukturen wurde direkt im REM gemessen. Die Struktur liegt am Ende des fluidischen Kanals und die Kanten sind schärfer ausgeprägt als in Abbildung 4.22.

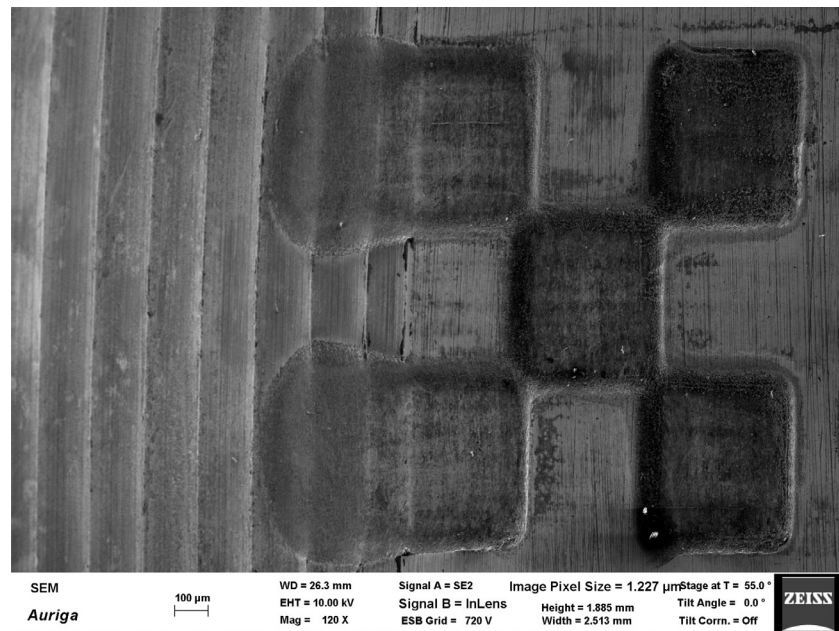


Abbildung 4.22. Detailaufnahme einer strukturierten Schachbrettstruktur. Die Struktur liegt am Anfang des fluidischen Kanals und die Kanten sind weniger scharf ausgeprägt als in Abbildung 4.21.

„MW“) sowie die absoluten (Spalte „Abw. abs.“) und prozentualen (Spalte „Abw. %“) Abweichungen von den Maßen der Gegenelektrode.

Betrachtet man die absoluten Abweichungen der Strukturbreiten von den Werten der Gegenelektrode, so zeigt sich, dass sie bei den Strukturen am Anfang des Kanals (Positionen 1 bis 3) tendenziell größer sind als bei den betreffenden Strukturen am Ende des Kanals (Positionen 4 bis 6, siehe auch Abbildung 4.23 für die relativen Abweichungen). So beträgt die Abweichung bei dem 500 μm breiten Elektrodenmuster an Position 1 nach 10 As 99,2 μm , während die Abweichung am Ende der Struktur an Position 6 nur 87,4 μm beträgt (46,7 μm und 35,2 μm Abweichung nach 5 As). Die jeweiligen Abweichungen nach 10 As sind etwa doppelt so groß wie nach 5 As. Dies lässt den Schluss zu, dass der Materialabtrag isotrop stattfindet; die Strukturauflösung ist also direkt von der Strukturtiefe abhängig. Damit lässt sich relativ einfach die Strukturtiefe aus der lateralen Auflösung und umgekehrt bestimmen. Lediglich der Punkt für 5 As an Position 3 weicht von diesem Muster ab und kann als Ausreisser betrachtet werden.

Die im Vergleich zu ihren Nachbarpositionen niedrigen Abweichungen an Position 4 lassen sich auf zwei Weisen deuten:

1. Die Abweichungen an Position 4 fallen klein aus. Das wäre dadurch bedingt, dass diese Struktur flacher als ihr Pendant an Position 3 ist. Die Metallionen haben sich durch den Abstand zwischen den Strukturen am Anfang und am Ende des Kanals weiter verteilt und durch die vier mal so große Fläche der danebenliegenden Rechtecke mit 250 μm Kantenlänge konzentriert dort der Abtrag. Am Anfang des Kanals findet dieser Effekt nicht statt, weil die Metallionenkonzentration in Werkstücknähe größer ist. Damit ließe sich auch die Abweichung des 5 As-Punktes an Position 3 erklären.
2. Die Abweichungen an Position 5 fallen groß aus. Aus den vorhergehenden Betrachtungen ist bekannt, dass die Strukturauflösung mit höherer Ionenkonzentration steigt. Daher sind die Abweichungen an den Positionen 4 und 6 kleiner als am Anfang des Kanals. Die erhöhten Abweichungen an Position 5 lassen sich damit erklären, dass durch eine Störung in den Strömungsverhältnissen hier die Ionenkonzentration lokal niedriger ist.

Die erste Erklärung ist wahrscheinlicher, weil die Störung bei zwei verschiedenen Gegenelektroden, an verschiedenen Positionen auf dem Werkstück bei unterschiedlichen Prozesszeiten im Falle der zweiten Betrachtungsweise identisch sein müsste. Eine endgültige Klärung kann an dieser Stelle jedoch nicht erfolgen.

4.2.3. Sensorstrukturen

Die in den vorhergehenden Abschnitten beobachteten Eigenschaften des Mikro-Elektrostrukturierprozesses lassen sich nutzen, um beispielsweise Sensorstrukturen auf metallischen Oberflächen herzustellen. Im Folgenden werden zwei Varianten von Dehnungsmessstreifen hergestellt. Die erste Variante ist ein kleiner Dehnungsmessstreifen auf der zylindrischen Lauffläche eines Radial-Zylinderrollenlagers. Die entsprechende flexible Gegenelektrode vom Typ 5 wird auf Seite 81 vorgestellt. Anschließend wird eine mehrlagige

4. Strukturierung

Tabelle 4.1. Messergebnisse des Schachbrettmusters bei 10 As und 5 As.

Position	Soll	10 As			5 As		
		MW	Abw. abs.	Abw. %	MW	Abw. abs.	Abw. %
Einlass	1 500 μm	599,2 μm	99,2 μm	19,8	546,7 μm	46,7 μm	9,3
	2 250 μm	316,1 μm	66,1 μm	26,5	284,6 μm	34,6 μm	13,8
	3 125 μm	161,1 μm	36,1 μm	28,9	162,1 μm	37,1 μm	29,6
	4 125 μm	147,4 μm	22,4 μm	17,9	133,1 μm	8,1 μm	6,4
	5 250 μm	320,1 μm	70,2 μm	28,1	291,8 μm	41,8 μm	16,7
Auslass	6 500 μm	587,4 μm	87,4 μm	17,5	535,2 μm	35,2 μm	7,0

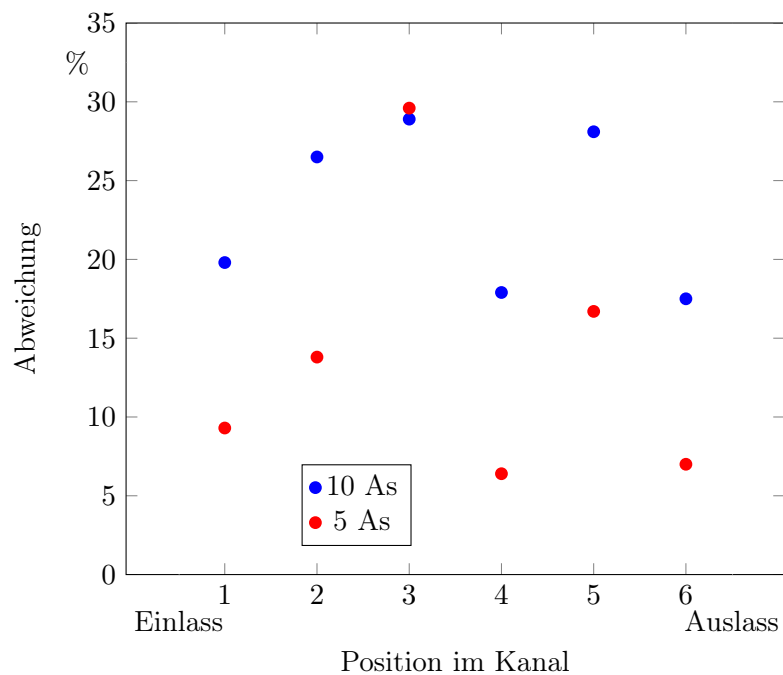


Abbildung 4.23. Prozentuale Abweichung der Strukturbreiten von der Sollbreite, abhängig von der geflossenen Ladungsmenge und damit der Strukturtiefe. Bis auf den 5 As-Wert an Position 3 haben die doppelt so tiefen Strukturen mit 10 As im Vergleich mit den 5 As-Strukturen auch doppelt so große Abweichungen.



Abbildung 4.24. Struktur eines Dehnungsmessstreifens auf einem Wälzlagering.

Gegenelektrode vom Typ 6 für einen wesentlich größeren Dehnungsmessstreifen (siehe Seite 81) verwendet.

Dehnungsmessstreifen klein

Der Lagering mit der hergestellten Struktur ist in Abbildung 4.24 zu sehen. Die DMS-Struktur befindet sich auf der Lauffläche des Innenrings, welcher einen Durchmesser von 36,5 mm hat. Die Kanalhöhe bei der Strukturierung betrug $20\text{ }\mu\text{m}$ und die übertragene Ladungsmenge 5 As. Der Strom mit einer Stromdichte von 100 A/cm^2 wurde mit 100 Hz und einer Einschaltzeit von 10 % gepulst. An dem Niederschlag rechts und links neben der Struktur ist erkennbar, dass der Kanal nicht vollständig abgedichtet wurde und etwas von dem Elektrolyten seitlich austreten konnte. Die Strömungsrichtung des Elektrolyten verläuft in diesem und den folgenden Bildern von rechts nach links.

Abbildung 4.25 zeigt eine REM-Aufnahme der hergestellten Struktur. Die breiten Bereiche auf der rechten Seite stellen die Anschluss terminals dar. Links davon schließt sich die eigentliche Sensorstruktur an, welche aus ineinander verschachtelten Mäandern besteht. Die sensitiven Bereiche sind schmaler gehalten, um den elektrischen Widerstand an diesen Stellen zu konzentrieren. Wie schon aus den vorhergehenden Untersuchungen bekannt ist, beeinflusst die Metallionenkonzentration die Strukturauflösung. Dies wird in Abbildung 4.26 deutlich. Durch den Steg zwischen den Anschluss terminals werden in der Mitte der Struktur keine Metallionen gelöst. Dadurch bildet sich im weiteren Verlauf dieses Streifens eine Zone mit niedrigerem Materialabtrag aus.

Das Besondere an dem Design dieses Dehnungsmessstreifens ist, dass eine echte dreidimensionale Struktur in einem einzigen Herstellungsschritt realisiert werden kann. Durch die unterschiedlichen lateralen Abmessungen der Sensorstruktur (breite Anschluss terminals, schmale Mäander) werden auch unterschiedliche Struktur Tiefen erreicht. Einige Tiefen der

4. Strukturierung

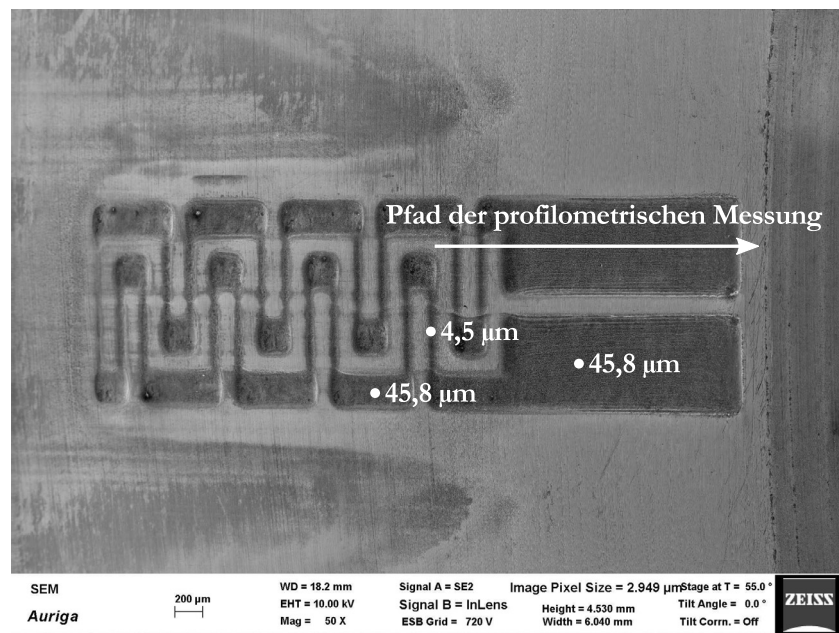


Abbildung 4.25. REM-Aufnahme der DMS-Struktur. Die Mäander des DMS sind ineinander verschachtelt. Eingezeichnet ist zudem der Pfad der profilometrischen Messung in Abbildung 4.27 und die Strukturtiefen an drei ausgewählten Punkten.

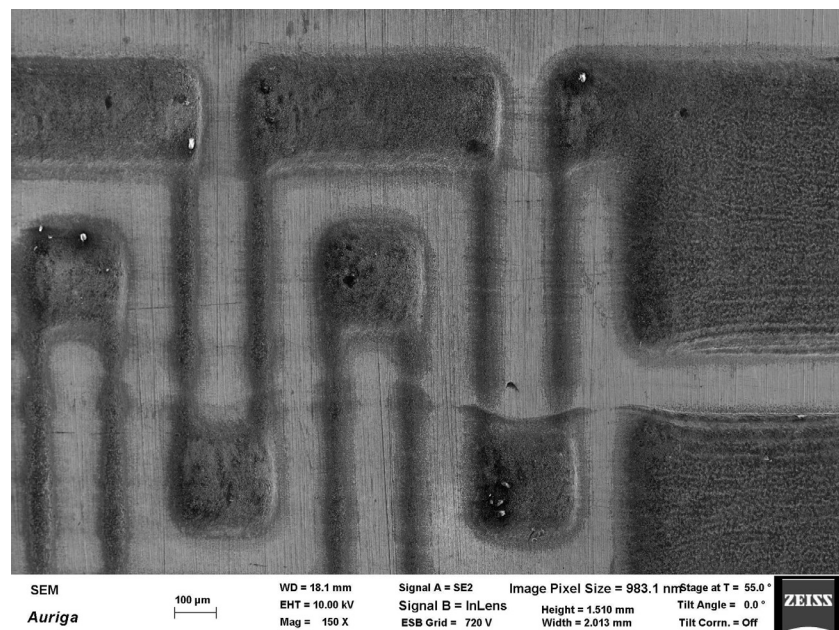


Abbildung 4.26. Detailaufnahme der Mäander. Es ist zu erkennen, wie durch den Steg zwischen den Kontaktflächen (rechts) im weiteren Verlauf nach links ein Streifen mit niedrigerer Abtragsrate entsteht.

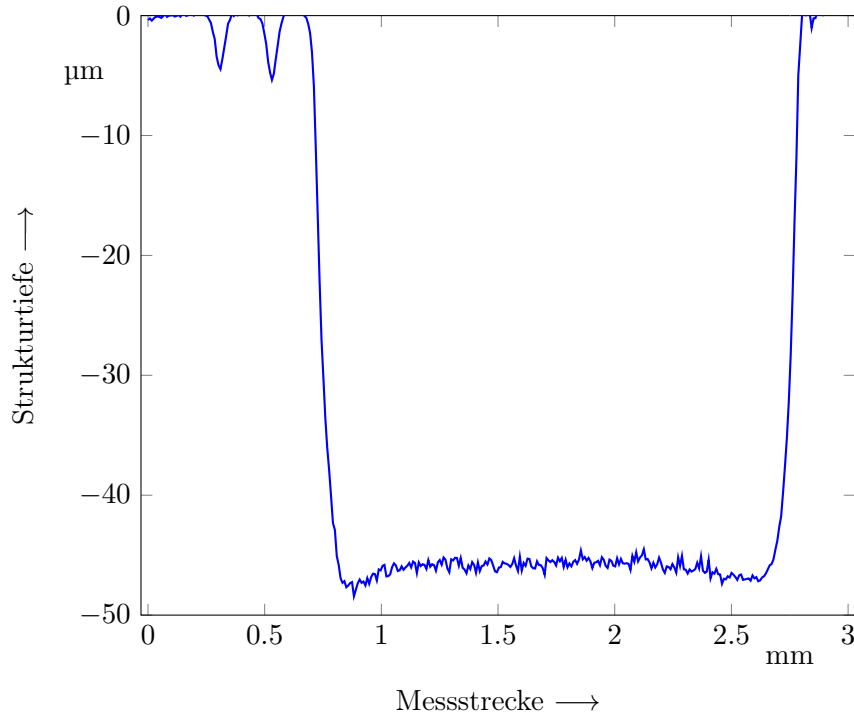


Abbildung 4.27. Profilometrische Messung entlang des in Abbildung 4.25 eingezeichneten Pfades.

Struktur sind in Abbildung 4.25 eingezeichnet. Während die Struktur an den Terminals und den breiten Stellen des Mäanders $45,8\mu\text{m}$ tief sind, sind die sensitiven Bereiche des Mäanders mit $4,5\mu\text{m}$ Tiefe etwa 90 % flacher. Dies bewirkt, würde die Sensorstruktur isoliert und mit einem leitfähigen Sensorwerkstoff gefüllt werden (siehe Abschnitt 1.2.2), dass der Widerstand des Sensor nicht nur aufgrund der lateralen Auflösung, sondern auch aufgrund der Höhe der Sensorstruktur auf den sensitiven Bereich der Mäander konzentriert ist. Die in Abbildung 4.27 dargestellte profilometrische Vermessung der Struktur zeigt das Höhenprofil entlang des in Abbildung 4.25 gezeigten Pfades. Links befinden sich die beiden Bahnen des Mäanders, die wesentlich schmaler und flacher sind, als der breite und tiefe Bereich der Anschluss terminals auf der rechten Seite der Abbildung. Es wird auch deutlich, dass die Mäanderstrukturen klar voneinander getrennt sind, auch wenn die Strukturen deutlich aufgeweitet wurden. Die Leiterbahnen sind im Elektrodendesign $25\mu\text{m}$ breit, die hergestellte Struktur ist jedoch mit $105\mu\text{m}$ Breite auf Höhe der ursprünglichen Oberfläche mehr als vier mal so Breit. Der Abtrag findet hier demnach nicht isotrop statt, sondern bewirkt eine überproportionale Verbreiterung der Struktur. Beim Anschluss terminal hingegen findet wieder ein isotroper Materialabtrag statt. Im Elektrodendesign ist dieser Bereich 2 mm lang und weitet sich durch die Strukturierung auf 2,1 mm auf. Bei einer Struktur tiefe von knapp $50\mu\text{m}$ ist dieser Zusammenhang klar erkennbar.

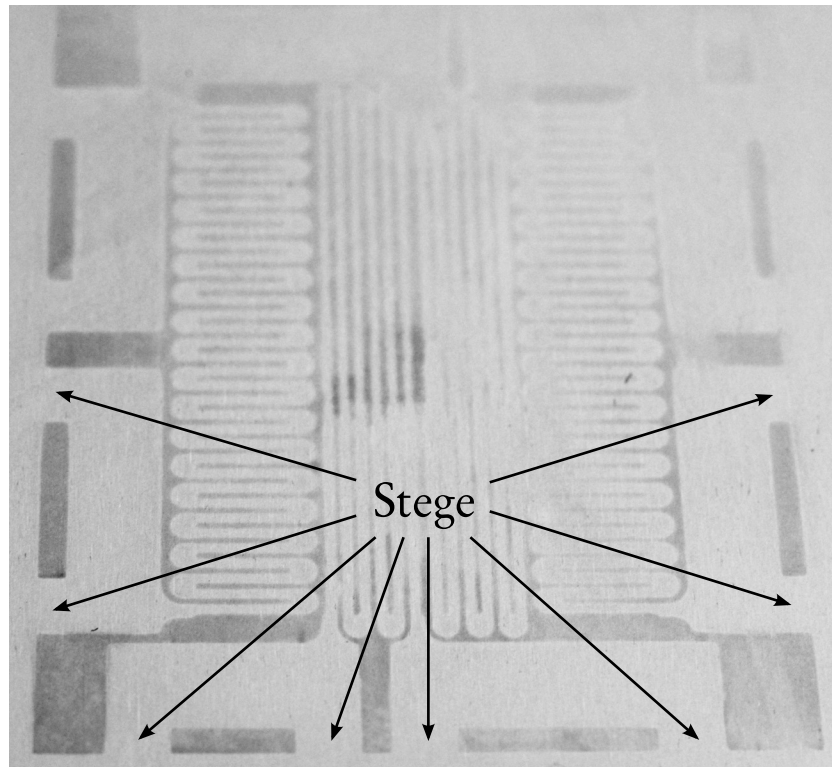


Abbildung 4.28. Ergebnis nach dem ersten Strukturierungsschritt mit einer mehrlagigen Gegenelektrode. Die innen liegenden Bereiche der Sensorstruktur sind weiterhin mit dem umliegenden Material durch Stege verbunden.

Dehnungsmessstreifen groß

Für die Herstellung des großen Dehnungsmessstreifens ist ein vergleichsweise hoher technologischer Aufwand notwendig. Zunächst ist die Herstellung mehrlagiger Gegenelektroden wesentlich aufwändiger als die Fabrikation einlagiger Gegenelektroden. Die hier verwendete flexible, mehrlagige Gegenelektrode ist auf Seite 81 abgebildet, ihre Herstellung wird in Abschnitt 3.3 beschrieben. Die strukturierte Fläche ist im Vergleich mit den vorhergehenden Strukturen mit 2 cm mal 3 cm etwa 100 mal größer. Für eine zuverlässige Elektrolytversorgung und bessere Abdichtung des Kanals wurde deshalb die 20 μm hohe Schicht, die den fluidischen Kanal bildet, durch eine Lage 1 mm starkes Moosgummi ersetzt, welches sich durch das Anpressen der Gegenelektrode auf das Werkstück stark zusammenpresst und eine zuverlässige Abdichtung ermöglicht. Dadurch wird die Kanalhöhe größer und eine zuverlässige Elektrolytströmung über die gesamte Breite des Kanals wird erreicht. Obwohl die Gegenelektrode flexibel ist und daher auch auf zylindrischen Oberflächen eingesetzt werden kann, wurden die Versuche auf planaren Substraten durchgeführt. Die Sensorstruktur ist zwar dafür ausgelegt, dünne metallische Schichten auf isolierenden Substraten zu bearbeiten, jedoch ist der verfügbare Elektrolyt nur für Stähle gut geeignet. Daher kamen 0,5 mm starke Edelstahlbleche zum Einsatz.

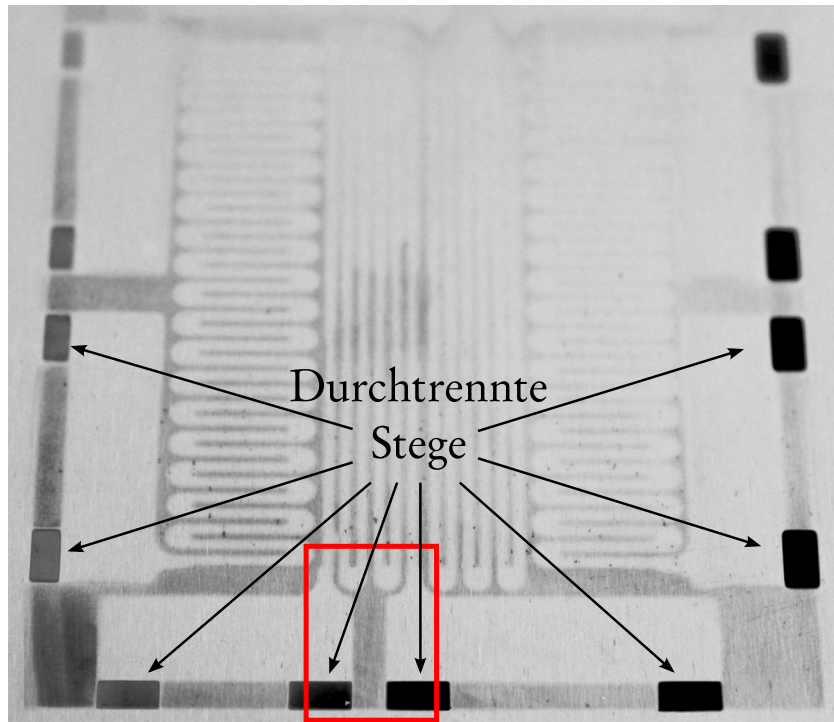


Abbildung 4.29. Ergebnis nach dem zweiten Strukturierungsschritt mit einer mehrlagigen Gegenelektrode. Die verbliebenen Stege wurde durch den zweiten Strukturierungsschritt durchtrennt. Der Rahmen zeigt den in Abbildung 4.30 dargestellten Ausschnitt.

Die verwendete Stromdichte ist aufgrund der sehr großen Fläche und dem durch das Labornetzgerät begrenzten Strom von 6 A um den Faktor 100 geringer und liegt im ersten Strukturierungsschritt bei etwa 1 A/cm. Dies ist für die Strukturierung von Edelstahl zu wenig, die Stromdichte sollte mindestens 20 A/cm betragen. Deshalb sind die Ergebnisse, was die Strukturauflösung und Rauheit betrifft, noch nicht optimal, der Nachweis der Funktionsfähigkeit der Strukturierung wird aber erbracht.

Abbildung 4.28 zeigt das Ergebnis der Strukturierung nach dem ersten Strukturierungsschritt. Die dunklen Bereiche wurden einige Nanometer tief strukturiert, die hellen Bereiche wurden nicht angegriffen. Damit bei der Strukturierung von dünnen metallischen Schichten auf isolierenden Substraten keine kurzschließenden Inseln, insbesondere in den langen Bereichen der Mäanderbahnen, entstehen, müssen diese Bahnen mit dem umliegenden Material verbunden bleiben. Dies geschieht durch zahlreiche Stege am Umfang der Struktur. Diese Stege werden, ohne Gegenelektrode und Werkstück zwischendurch zu trennen, im zweiten Strukturierungsschritt entfernt. Das Ergebnis ist in Abbildung 4.29 zu sehen. Für diesen Schritt wurde eine höhere Stromdichte als im ersten Schritt verwendet, um einerseits eine schnellere Strukturierung zu ermöglichen und andererseits das elektrische Feld stärker streuen zu lassen. Damit wird erreicht, dass die Stege zuverlässig entfernt werden, wie in Abbildung 4.30 zu sehen ist. Links im Bild sind die runden Enden

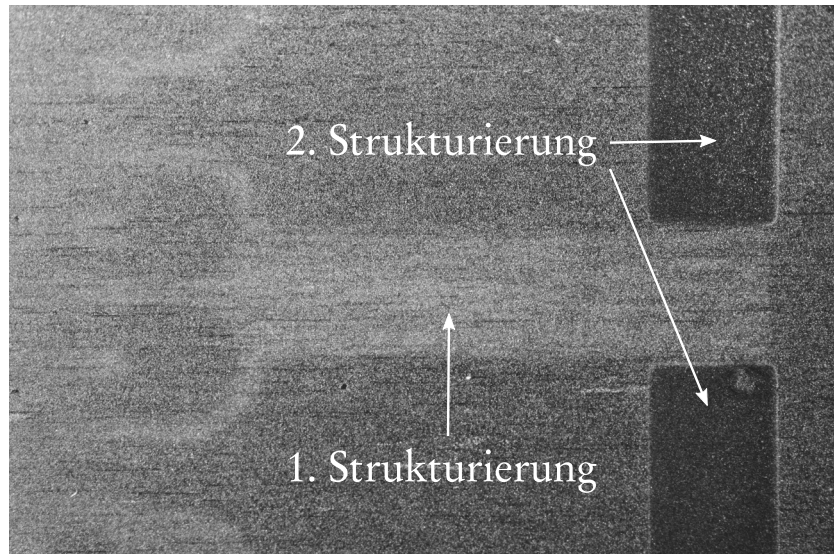


Abbildung 4.30. Detailaufnahme der durchtrennten Stege nach der zweiten Strukturierung. Die rechteckigen Strukturen des zweiten Schritts sind durch die Streuung des elektrischen Feldes etwas größer als die Strukturen des ersten Schritts, sodass eine sichere Trennung zwischen innerer und äußerer Struktur erfolgt.

der Mäander sichtbar, rechts sind zwei entfernte Stege zu sehen. Durch das aufgeweitete elektrische Feld sind die entfernten Bereiche größer als die ursprünglichen Stege, obwohl sich auf der Gegenelektrode zwischen der ersten und zweiten leitfähigen Schicht ein $2\text{ }\mu\text{m}$ großer Abstand befindet.

Dieser Prozess ist insbesondere für die Strukturierung dünner, metallischer Schichten geeignet. Die erreichbaren Strukturauflösungen liegen im Bereich von etwa $50\text{ }\mu\text{m}$, so dass es sich nur für vergleichsweise grobe Strukturen eignet. Im Gegensatz zu in der Mikrosystemtechnik klassischerweise eingesetzten Lithographie mit anschließender nass- oder trockenchemischer Ätzung ist dieses Verfahren mit etwa 20 s Strukturierzeit wesentlich schneller. Damit empfiehlt es sich sehr große Stückzahlen, bei dem der Aufwand zur Herstellung der Gegenelektroden vergleichsweise klein ausfällt.

5. Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurde das Verfahren des Mikro-Elektrostrukturierens weiterentwickelt. Neben dem bisherigen maskenlosen Strukturieren und dem Strukturieren mit Maske, bei dem sich die Maske mit der zu übertragenen Struktur auf dem Werkstück befindet, wurde das Portfolio um einen Prozess mit strukturierten Gegenelektroden erweitert. Auf den Ergebnissen von Schöneberger und Roy [85, 86] aufbauend, wurde der Prozess dahingehend weiterentwickelt, dass

- die Bearbeitung gehärteter Stähle und anderer Metalle
- mit planaren und zylindrischen Oberflächen,
- die Herstellung dreidimensionaler Strukturen
- und die einfache relative Positionierung mehrerer Strukturen zueinander
- in einer sehr kurzen Prozesszeit

ermöglicht wird. Zum Verständnis der Prozessabläufe wurde ein analytisches und ein FEM-Modell entwickelt. Mit diesen Modellen ist es möglich, sowohl den Einfluss des Elektrodendesigns auf die Strukturtiefe als auch auf die laterale Strukturauflösung im Voraus zu berechnen und damit das Elektrodendesign zu optimieren. Als weiterer Einflussfaktor wurde ein sich veränderndes Strömungsprofil durch einen sich ändernden Querschnitt des fluidischen Kanals ausgemacht.

Diese theoretischen Ergebnisse wurden anschließend mit praktischen Ergebnissen gestützt. Die aus der Literatur bekannten Gegenelektroden wurden dahingehend weiterentwickelt, dass

- der fluidische Kanal in die Gegenelektrode integriert wird,
- über diesen Kanal das Strukturergebnis beeinflusst werden kann,
- die Gegenelektroden durch die Nutzung von Folien und dünnen metallischen Schichten flexibel ausgeführt werden können
- und über die Nutzung mehrerer Lagen von Isolationsschichten und Metallisierungen mehrlagige Gegenelektroden hergestellt werden können.

Mit diesen Gegenelektroden wurden zahlreiche Strukturierungen vorgenommen. Dabei zeigte sich, dass die theoretischen Ergebnisse der Simulationen meist sehr gut die praktischen Ergebnisse vorhersagen. Lediglich bei sich verengenden Querschnitten des fluidischen Kanals ist das analytische Modell bisher zu weit von den realen Ergebnissen entfernt.

Zusammenfassend lassen sich die Entwicklungen des Prozesses wie folgt beschreiben:

5. Zusammenfassung und Ausblick

- Der Arbeitsabstand zwischen den Elektroden wurde von 500 μm auf 20 μm verringert.
- Die minimale laterale Auflösung wurde von über 100 μm auf unter 50 μm gesenkt.
- Stromdichten von 100 A/cm² sind bei Pulsung des Stroms auch bei flexiblen und mehrlagigen Gegenelektroden möglich.
- Die typische Prozessdauer liegt bei etwa 20 s und ist unabhängig von der zu strukturierenden Fläche.

In zukünftigen Entwicklungen sollte die Fluidversorgung optimiert werden. Aber auch Anpassungen des Elektrolyten und des Materials der Gegenelektroden an das Material des Werkstückes sind notwendig. Damit werden weitere Anpassungen bezüglich der Stromdichte und Prozessdauer einhergehen. Schlussendlich stellt der vorgestellte Fertigungsprozess für die Einbettung von Sensorelementen in die Oberfläche von zu überwachenden Bauteilen lediglich einen Teilschritt dar. Deshalb sollten weitere Untersuchungen und Entwicklungen bezüglich der Schichtabscheidung und des Schleifens der strukturierten Flächen stattfinden.

A. Anhang

A.1. Charakterisierung des sensorischen Lagers

Die folgenden Abschnitte beschreiben die Charakterisierung des in Abschnitt 1.2.1 vorgestellten sensorischen Lagers.

A.1.1. Aufbau- und Verbindungstechnik

Eine Platine, die eine Wheatstone-Brücke für jeden der zehn Sensoren pro Lager bereitstellt, wurde entworfen. Die Brücke ist als Viertelbrücke geschaltet. Die Brückenspannung wird anschließend durch einen Instrumentenverstärker (INA) verstärkt. Die Platine wird mit Epoxdharz an die Lagerscheibe geklebt. Zur elektrischen Kontaktierung der Sensoren wird zunächst das Al_2O_3 an den Bondstellen mittels Ultraschall mit einem Bondgerät entfernt und anschließend drahtgebondet. Die Bonddrähte werden mit einem Resin geschützt. Der komplette Aufbau ist in Abbildung 1.3 auf Seite 7 abgebildet.

A.1.2. Messaufbau

Zur Analyse der Sensoren wird ein Kraftmessplatz verwendet (Abbildung A.1). Dieser besteht aus einem Stahlrahmen, der einen Hydraulikzylinder hält. Der Hydraulikdruck wird über eine Steuerspannung eingestellt und die Kraft kann stufenlos zwischen 0 kN und 10 kN gesteuert werden.

Eine Kraftmessdose vom Typ *KAF-S* der Firma *A.S.T.* mit 10 kN Messbereich bei 0,2% Fehler ist an dem Hydraulikzylinder befestigt. Die Kraftmessdose wiederum wird durch eine *A.S.T. AE 903* Anzeigeeinheit mit 320 Samples/s ausgelesen.

Die mit Sensoren ausgestattete Lagerscheibe wird in dem Rahmen unter der Kraftmessdose platziert. Zwischen dieser und der Lagerscheibe wird ein Wälzkörper platziert. Auf diese Weise sind der hergestellte Sensor und die Kraftmessdose in serieller Anordnung und messen gleichzeitig die Kraft, die durch den Hydraulikzylinder aufgebracht wird.

Ein Labview-Programm zur Steuerung der Hydraulik und Datenaufnahme wurde entwickelt. Die Anzeigeeinheit der Kraftmessdose wird via RS485 ausgelesen und liefert geglättete Messdaten, während die Brückenspannung des hergestellten Sensors ohne Glättung über eine *National Instruments USB-6212*-Messkarte digitalisiert wird. Die Daten werden mit 320 Samples/s aufgenommen.

A.1.3. Messergebnisse

Zunächst wurde jeweils der Widerstand der Sensorelemente ohne angeschlossene Elektronik gemessen. Dieser Basiswiderstand variiert zwischen 31,7 k Ω und 47,3 k Ω und ist abhängig

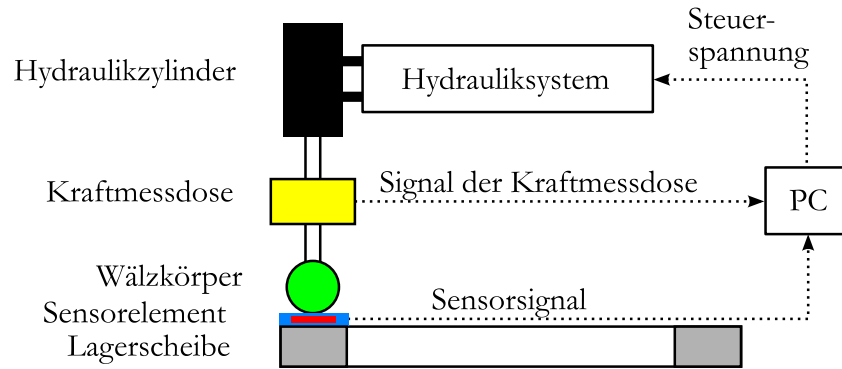


Abbildung A.1. Schematische Darstellung des Messaufbaus. Ein Hydraulikzylinder drückt gleichzeitig auf eine Kraftmessdose und eines der Sensorelemente auf dem Lager.

vom Sensordesign und der damit verbundenen Leiterbahnlänge.

Ein Sinussignal zur Simulation eines sich drehenden Lagers wird verwendet, um das Hydraulikaggregat zu steuern. Die maximal aufgebrachte Kraft beträgt knapp 6 kN. Dies entspricht der doppelten dynamischen Tragzahl des Lagers, bezogen auf ein Wälzelement. Abbildung A.2 zeigt das Verhalten des Systems für einen Messzyklus von 0,75 Sekunden. Die Hydrauliksteuerspannung wird dazu von 0 V auf 6 V erhöht. Die Kraftmessdose liefert einen Maximalwert von 5,29 kN, während die verstärkte Brückenspannung geglättet maximal 21,58 mV beträgt.

Beide Messsignale folgen der aufgebrachten Kraft in vollem Maße. Es kann beobachtet werden, dass das Signal des Wälzlagersensors die auftretenden Belastungen etwas früher als die Kraftmessdose anzeigt. Dies liegt darin begründet, dass das Signal der Kraftmessdose wahrscheinlich intern geglättet wird. Die Empfindlichkeit des Wälzlagersensors beträgt 4,08 mV/kN.

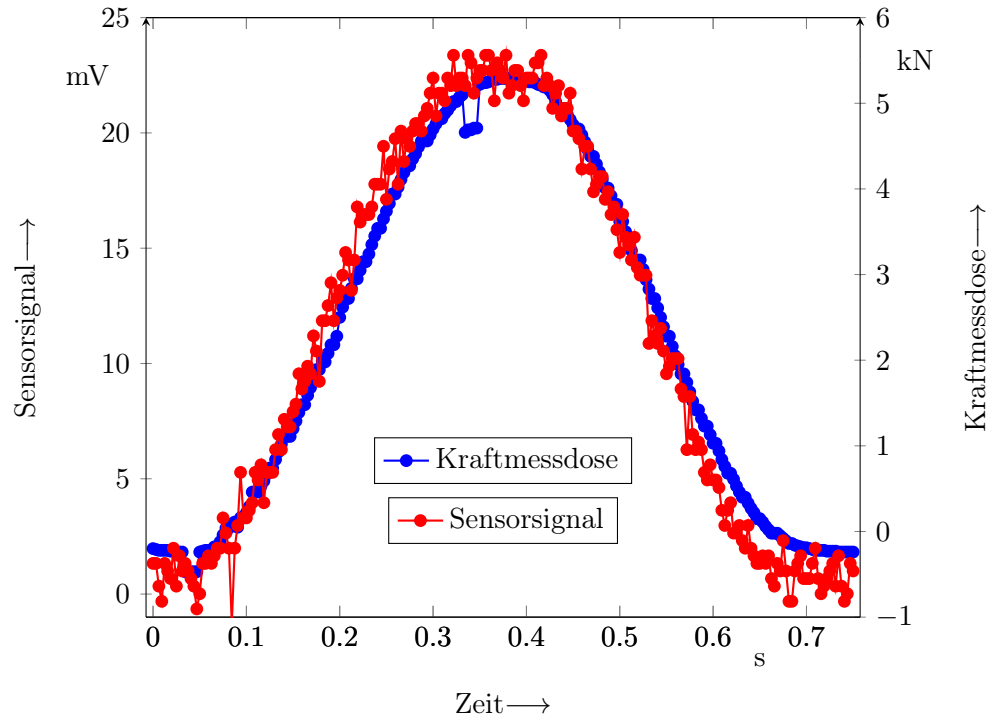


Abbildung A.2. Zeitlicher Verlauf des Sensorsignals und der Kraftmessdose während einer 0,75 s andauernden, sinusförmigen Belastung. Die Empfindlichkeit des hergestellten Sensorsystems beträgt 4,08 mV/kN.

A.2. Quellcodes

A.2.1. Analytisches Modell

Das Modell wurde mit GNU Octave erstellt und mit Version 3.6.3 getestet.

```

1  %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
2  % Definition der Parameter
3  %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
4  clear all % Alle Variablen löschen
5  format short e % Angabe des Zahlenformats
6  Figure_nr = 0 % Laufende Hilfsvariable für mehrere Grafiken
7
8  h_Kanal = 20E-6 % [m] Höhe des Kanals
9  l_Kanal = 10.5E-3 % [m] Länge des Kanals
10 l_Elektrode = 7.5E-3 % [m] Länge der Gegenelektrode
11 b_Elektrode = 450E-6 % [m] Breite der Gegenelektrode
12 bE_Kanal = 2E-3 % [m] Breite des Kanals Einlass
13 bA_Kanal = 2E-3 % [m] Breite des Kanals Auslass
14 l_Einlauf = 0E-3 % [m] Länge des Einlaufs

```

A. Anhang

```

15 l_Auslauf = 0E-3 % [m] Länge des Auslaufs
16 mu = 1.812e-9 % [m^2/(V*s)] Ionenbeweglichkeit
17 etaH2O = 1E-3 % [Pa*s] Dynamische Viskosität
18 delta_p = 1E5 % [Pa] Druckunterschied
19 S_Kanal = 16.12 % [S/m] Leitfähigkeit des Kanals
20 J = 10E4 % [A/m^2] Stromdichte im Kanal
21 on = 100 % Anschaltzeit in % von t_max
22 Fs = 1.36 % Strukturfaktor Fs aus den Ergebnissen der
    FEM-Simulation. Abhängig von Druck, Kanalhöhe und
    Stromdichte.
23
24 n_Koordinaten = 500 % Anzahl der Wertepaare in x- und y-
    Richtung
25 m_Pfade = 500 % Anzahl der Pfadlinien
26 n_Raster = 100 % Rastergröße für die Auswertung
27
28 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
29 % Berechnung der abgeleiteten Prozessparameter
30 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
31 J_Prozess = J * on / 100
32 I_Kanal = J_Prozess * l_Elektrode * b_Elektrode % [A] Strom im
    Kanal
33 R_Kanal = 1 / S_Kanal * h_Kanal / l_Elektrode / b_Elektrode %
    [Ohm] Annahme, dass der Strom nur direkt durch den Kanal
    unter der GE fließt.
34 U_Kanal = R_Kanal * I_Kanal % [V] Spannung in V zwischen den
    Elektroden
35 t_max = h_Kanal / mu / U_Kanal * h_Kanal % [s] Zeit, die ein
    Ion von einer zur anderen Elektrode braucht
36 t_Schritt = t_max / n_Koordinaten % Zeitschritt
37 t_on = t_max
38
39 Abtragsfaktor = 2.4494e-11 % [m^3/As] Berechnet aus dem ersten
    Faradayschen Gesetz
40 Abtragsrate = Abtragsfaktor / (l_Elektrode * b_Elektrode)
41 Ladungsmenge = [0.1 0.2 0.5 1.0] % [A*s] Diese Werte werden
    betrachtet
42
43 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
44 % Berechnung der maximalen Strömungsgeschwindigkeit am
45 % Scheitelpunkt der Strömungsparabel
46 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
47 n_Einlauf = l_Einlauf / l_Kanal * n_Koordinaten;
48 n_Auslauf = l_Auslauf / l_Kanal * n_Koordinaten;

```

```

49
50 R_Einlauf = 12 * etaH20 * l_Einlauf / (h_Kanal^3 * bE_Kanal); %
    Fluidischer Widerstand des Einlaufs
51 R_Uebergang = 12 * etaH20 * (l_Kanal - l_Einlauf - l_Auslauf) /
    (h_Kanal^3 * (bE_Kanal + bA_Kanal) / 2); % Fluidischer
    Widerstand des Übergangsstücks (linear!)
52 R_Auslauf = 12 * etaH20 * l_Auslauf / (h_Kanal ^ 3 * bA_Kanal);
    % Fluidischer Widerstand des Auslaufs
53
54 V_Punkt = delta_p / (R_Einlauf + R_Uebergang + R_Auslauf); %
    Volumenstrom
55 v_xmaxE = V_Punkt / (h_Kanal * bE_Kanal) * 2 % Max.
    Geschwindigkeit im Einlauf
56 v_xmaxA = V_Punkt / (h_Kanal * bA_Kanal) * 2 % Max.
    Geschwindigkeit im Auslauf
57 v_xmax = [ones(1, n_Einlauf) * v_xmaxE linspace(v_xmaxE,
    v_xmaxA, n_Koordinaten - n_Einlauf - n_Auslauf) ones(1,
    n_Auslauf) * v_xmaxA]; % Im Zwischenstück wird linear
    interpoliert
58
59 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
60 % Berechnung der y-Koordinaten der Ionenbewegung
61 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
62 y_ion = [0 : mu * U_Kanal / h_Kanal * t_Schritt : mu * U_Kanal
    / h_Kanal * t_Schritt * n_Koordinaten * on / 100 - 1 *
    ones(1, n_Koordinaten * (1 - on / 100))];
63
64 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
65 % Die Werte für die Zweige der x-Koordinaten werden in das
66 % Array geschrieben. Die Zweige sind jeweils um l_Elektrode /
67 % m_Pfade nach rechts verschoben.
68 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
69 h_Kanal_sq = h_Kanal ^ 2;
70 h_Kanal_2 = h_Kanal / 2;
71 for j = 1:1:m_Pfade + 1
72     for i = 1:1:n_Koordinaten + 1
73         if i == 1
74             X_ion(i, j) = (l_Elektrode / m_Pfade) * (j - 1);
75         else
76             indexX = round(X_ion(i-1, j) / l_Elektrode *
                n_Koordinaten + 1);
77             if indexX >= n_Koordinaten
78                 indexX = n_Koordinaten - 1;

```

```

79     end
80     v_x = v_xmax(indexX);
81     v = (-4 * v_x / h_Kanal_sq * (y_ion(i) - h_Kanal_2) ^ 2 +
          v_x);
82     X_ion(i, j) = v * t_Schritt + X_ion(i - 1, j);
83     end
84   end
85 end
86
87 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
88 % Auszählung der Anzahl der Ionen in Streifen
89 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
90 min_x = l_Elektrode / n_Raster * (0:n_Raster - 1); % Festlegen
    des unteren x-Wertes
91 max_x = l_Elektrode / n_Raster * (1:n_Raster); % Festlegen des
    oberen x-Wertes
92
93 R_min_x = bsxfun(@ge, X_ion(:), min_x); % Suche die Positionen
    aller Werte in X_ion, die größer oder gleich (ge) als min_x
    sind
94 R_max_x = bsxfun(@lt, X_ion(:), max_x); % Suche die Positionen
    aller Werte in X_ion, die kleiner als (lt) max_x sind
95
96 Rx = R_min_x & R_max_x; % Schau nach, welche Positionen in
    beiden Vektoren vorkommen
97
98 IonenSumme = sum(Rx); % Addiere die Anzahl der Positionen. Das
    ergibt die Anzahl der Ionen in einem Streifen
99 IonenSumme_rel = IonenSumme / max(IonenSumme); % Abschließend
    noch normieren
100
101 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
102 % Auszählung der Ionen im Raster:
103 % Dieser Schritt ist nur zur Visualisierung der Verteilung
104 % notwendig, nicht aber für die Berechnung der Struktur-
105 % tiefe. Durch die Schleifen dauert die Ausführung sehr
106 % lange und ist bei großen Rastern nicht zu empfehlen.
107 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
108 Ionen = zeros(n_Raster);
109
110 for j = 1:1:n_Raster
111   for i = 1:1:n_Raster
112     min_x = l_Elektrode / n_Raster * (i-1);
113     max_x = l_Elektrode / n_Raster * i;

```

```

114     min_y = h_Kanal / n_Raster * (j-1);
115     max_y = h_Kanal / n_Raster * j;
116     Ionen(i,j) = length(find(X_ion >= min_x & X_ion < max_x &
        repmat(y_ion', 1, m_Pfade+1) >= min_y & repmat(y_ion',
            1, m_Pfade+1) < max_y));
117     end
118 end
119
120 Ionenneu=Ionen' / max(Ionen(:));
121
122 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
123 % Hier wird nun abgetragen:
124 % Die Tiefe des Grabens setzt sich zusammen aus einem
125 % Anteil ohne Einfluss durch die Ionenanreicherung und
126 % einem mit Ionenanreicherung. Das Verhältnis wird durch
127 % den Strukturfaktor aus der FEM-Simulation bestimmt
128 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
129 Graben = (Ladungsmenge .* Abtragsrate)' * (1 + (Fs-1) *
        IonenSumme_rel);
130
131
132 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
133 % Ausgabe
134 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
135
136 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
137 % Ausgabe der Ionenpfade
138
139 Figure_nr = Figure_nr + 1;
140 figure(Figure_nr);
141 plot(X_ion*1000,y_ion*1000000, 'x');
142 title('Pfade_der_Ionen_im_Kanal');
143 xlabel('$x_{in\_mm}$');
144 ylabel('$y_{in\_micro\_m}$');
145 xlabel('x_in_mm');
146 ylabel('y_in_micro_m');
147 axis([0,l_Elektrode*1000,0,h_Kanal*1000000]);
148
149 % Speichern der Daten zur Weiterverarbeitung
150 Data1 = [y_ion'*1E6 X_ion(:,1)*1E3 X_ion(:,2)*1E3
        X_ion(:,3)*1E3 X_ion(:,4)*1E3 X_ion(:,5)*1E3 X_ion(:,6)*1E3
        X_ion(:,7)*1E3 X_ion(:,8)*1E3 X_ion(:,9)*1E3
        X_ion(:,10)*1E3 X_ion(:,11)*1E3];
151 save -ascii Weg_Ionen.dat Data1;

```



```

152 Data2 = [y_ion'*1E6 X_ion(:,1)*1E3 X_ion(:,2)*1E3
           X_ion(:,3)*1E3 X_ion(:,4)*1E3 X_ion(:,5)*1E3 X_ion(:,6)*1E3
           X_ion(:,7)*1E3 X_ion(:,8)*1E3 X_ion(:,9)*1E3
           X_ion(:,10)*1E3 X_ion(:,11)*1E3 X_ion(:,12)*1E3
           X_ion(:,13)*1E3 X_ion(:,14)*1E3 X_ion(:,15)*1E3
           X_ion(:,16)*1E3 X_ion(:,17)*1E3 X_ion(:,18)*1E3
           X_ion(:,19)*1E3 X_ion(:,20)*1E3 X_ion(:,21)*1E3
           X_ion(:,22)*1E3 X_ion(:,23)*1E3 X_ion(:,24)*1E3
           X_ion(:,25)*1E3 X_ion(:,26)*1E3];
153 save -ascii Ionen_Raster.dat Data2;
154
155 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
156 % Ausgabe der Ionenmatrix
157
158 Figure_nr = Figure_nr + 1;
159 figure(Figure_nr);
160 contourf(Ionenneu);
161 cb=colorbar;
162 xlabel("n_{Raster}");
163 ylabel("h_{Kanal}/n_{Raster}");
164 axis([1,n_Raster,1,n_Raster]);
165 ylabel(cb,'Relative_Anzahl_der_Ionen');
166
167
168 % Speichern der Daten zur Weiterverarbeitung
169 Data0=[ones(n_Raster,1)*1 (1:n_Raster)' Ionenneu(:,1)];
170 Data1=[ones(n_Raster,1)*2 (1:n_Raster)' Ionenneu(:,2)];
171 Data2=[ones(n_Raster,1)*3 (1:n_Raster)' Ionenneu(:,3)];
172 Data3=[ones(n_Raster,1)*4 (1:n_Raster)' Ionenneu(:,4)];
173 Data4=[ones(n_Raster,1)*5 (1:n_Raster)' Ionenneu(:,5)];
174 Data5=[ones(n_Raster,1)*6 (1:n_Raster)' Ionenneu(:,6)];
175 Data6=[ones(n_Raster,1)*7 (1:n_Raster)' Ionenneu(:,7)];
176 Data7=[ones(n_Raster,1)*8 (1:n_Raster)' Ionenneu(:,8)];
177 save -ascii Anzahl_Ionen.dat Data0 Data1 Data2 Data3 Data4
           Data5 Data6 Data7;
178
179 print -dpdf '-S800,400' Anzahl_Ionen.pdf;
180
181 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
182 % Ausgabe der relative Ionensumme
183
184 Figure_nr = Figure_nr + 1;
185 figure(Figure_nr);
186 plot(1:n_Raster,IonenSumme_rel);

```

```

187 xlabel('Raster');
188 ylabel('Relative_Verteilung_der_Ionen');
189
190 Data0 = [(1:n_Raster)' IonenSumme_rel'];
191 save -ascii Summe_Ionen.dat Data0;
192
193 print -dpdf '-S600,400' Summe_Ionen.pdf;
194
195 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
196 % Ausgabe des Kanals
197
198 Figure_nr = Figure_nr + 1;
199 figure(Figure_nr);
200 plot(1:n_Raster,IonenSumme/max(IonenSumme(:)));
201 plot(1:n_Raster,-Graben*1E6);
202 xlabel('x_in_l_Kanal/n_Raster');
203 ylabel('Grabentiefe_in_Micron');
204 axis([1,n_Raster,-10,0]);
205
206 Data0 = [linspace(0,l_Elektrode*1E3,n_Raster)'
           -Graben_kor(1,:) '*1E6 -Graben_kor(2,:) '*1E6
           -Graben_kor(3,:) '*1E6 -Graben_kor(4,:) '*1E6];
207 save -ascii A3B4C4.dat Data0;
208
209 print -dpdf '-S600,400' Ana_Graben.pdf;

```

A.3. Simulationsergebnisse FEM

A.3.1. Strukturprofil

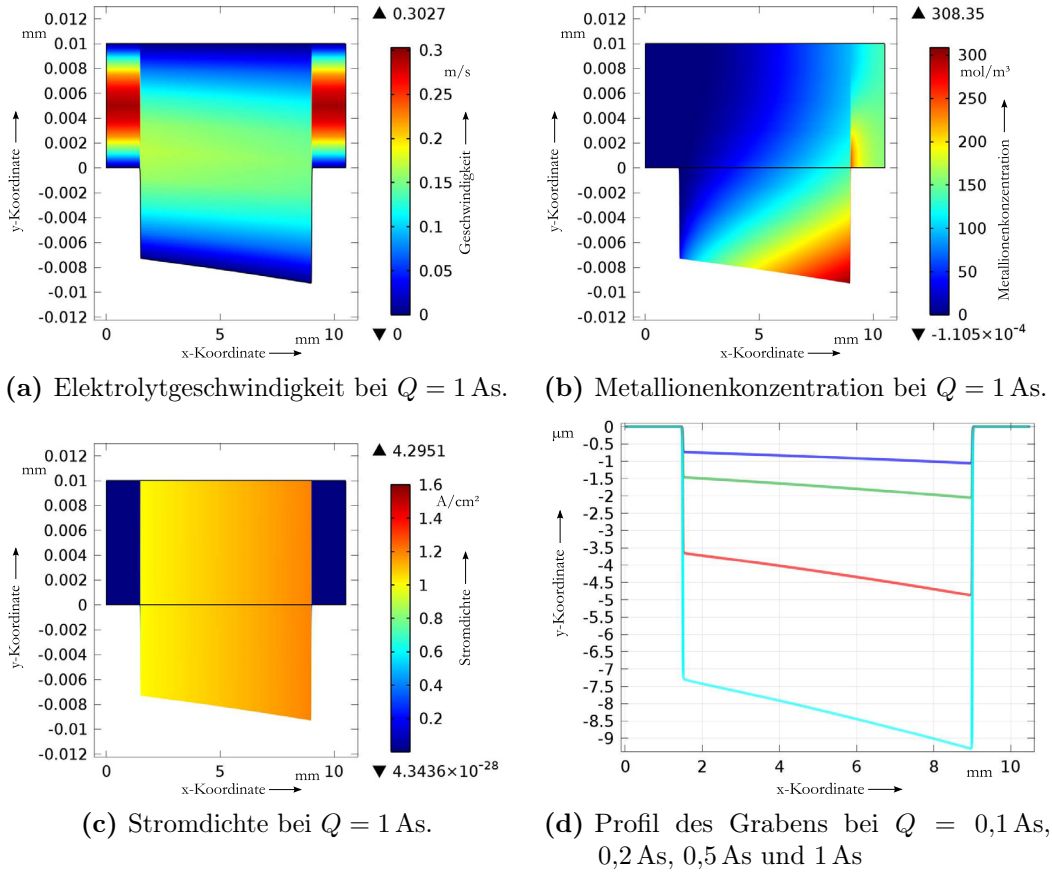
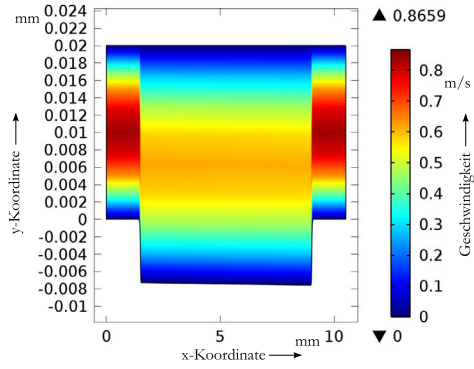
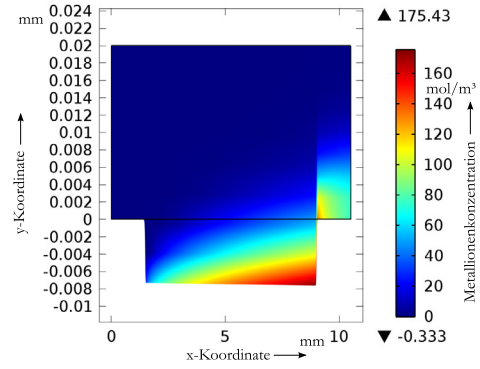


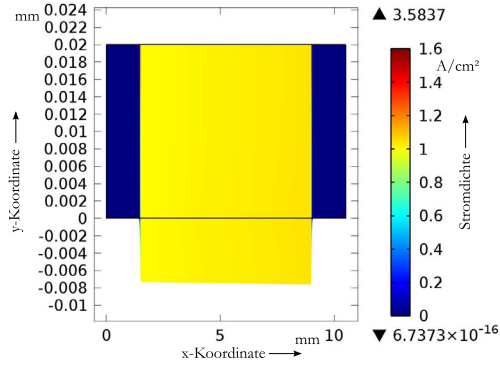
Abbildung A.3. Kanalhöhe $H_{Kanal} = 10 \mu\text{m}$, Stromdichte $J = 1 \text{ A/cm}^2$, Druck $p_{in} = 1,0 \text{ bar}$.



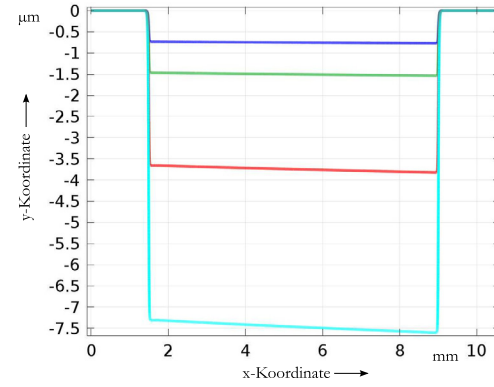
(a) Elektrolytgeschwindigkeit bei $Q = 1$ As.



(b) Metallionenkonzentration bei $Q = 1$ As.



(c) Stromdichte bei $Q = 1$ As.



(d) Profil des Grabens bei $Q = 0,1$ As, $0,2$ As, $0,5$ As und 1 As

Abbildung A.4. Kanalhöhe $H_{Kanal} = 20 \mu\text{m}$, Stromdichte $J = 1 \text{ A/cm}^2$, Druck $p_{in} = 1,0 \text{ bar}$.

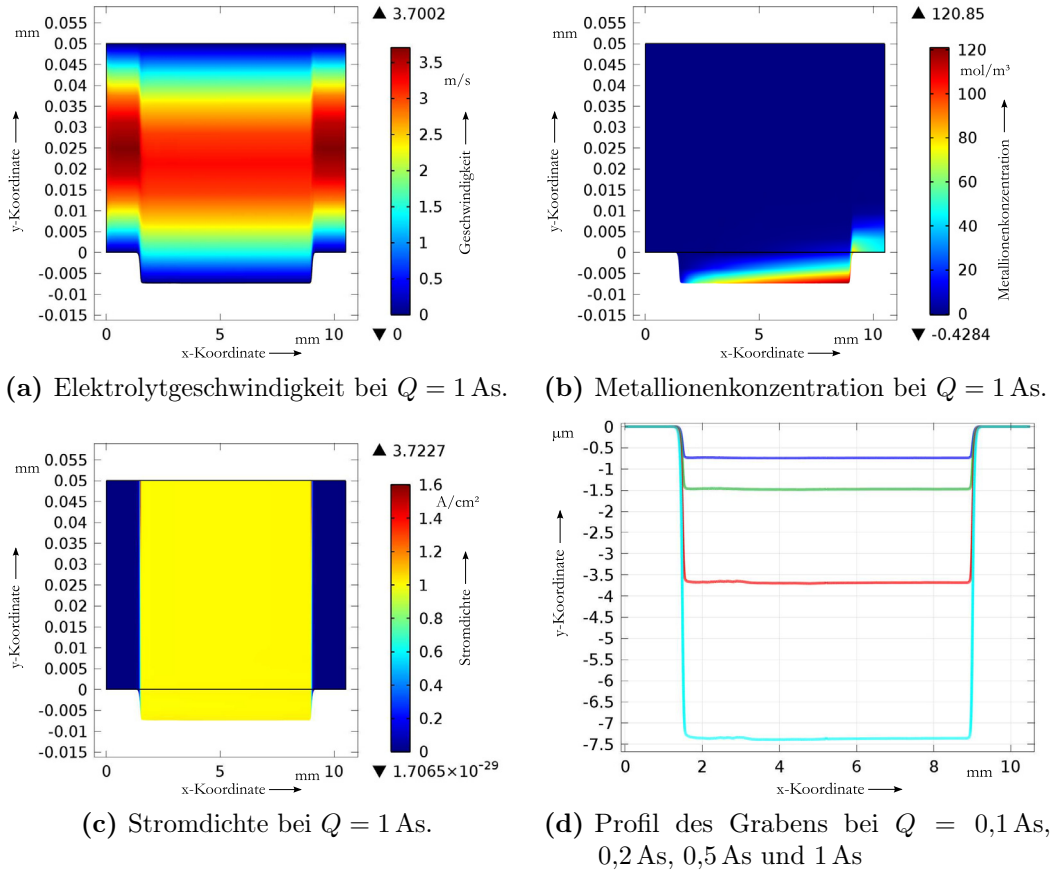


Abbildung A.5. Kanalhöhe $H_{Kanal} = 50 \mu\text{m}$, Stromdichte $J = 1 \text{ A/cm}^2$, Druck $p_{in} = 1,0 \text{ bar}$.

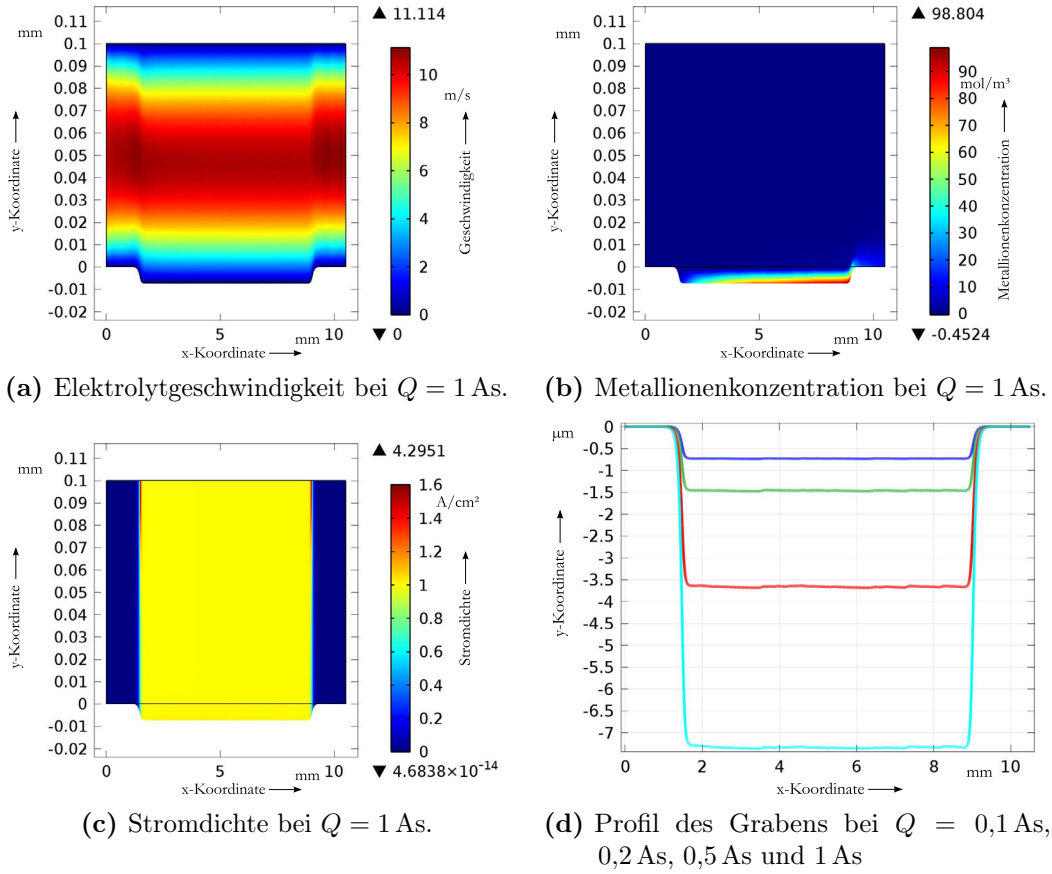


Abbildung A.6. Kanalhöhe $H_{Kanal} = 100 \mu\text{m}$, Stromdichte $J = 1 \text{ A/cm}^2$, Druck $p_{in} = 1,0 \text{ bar}$.

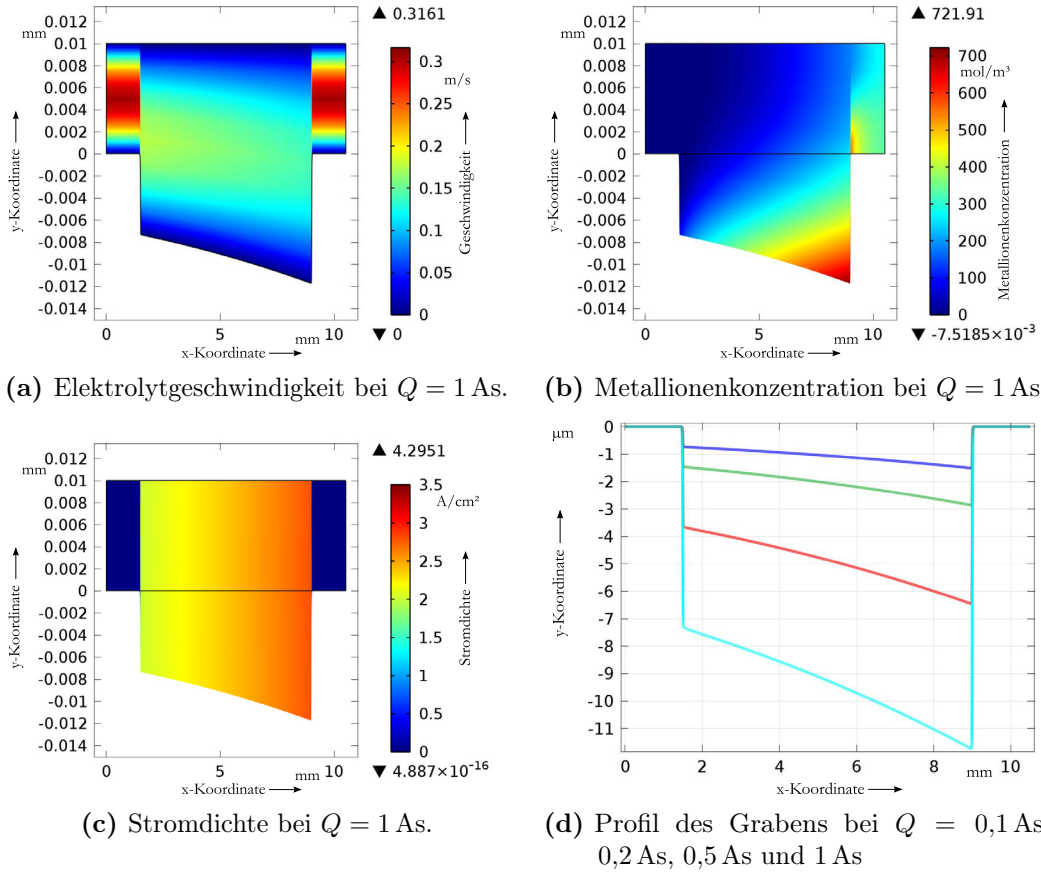


Abbildung A.7. Kanalhöhe $H_{Kanal} = 10 \mu\text{m}$, Stromdichte $J = 2 \text{ A/cm}^2$, Druck $p_{in} = 1,0 \text{ bar}$.

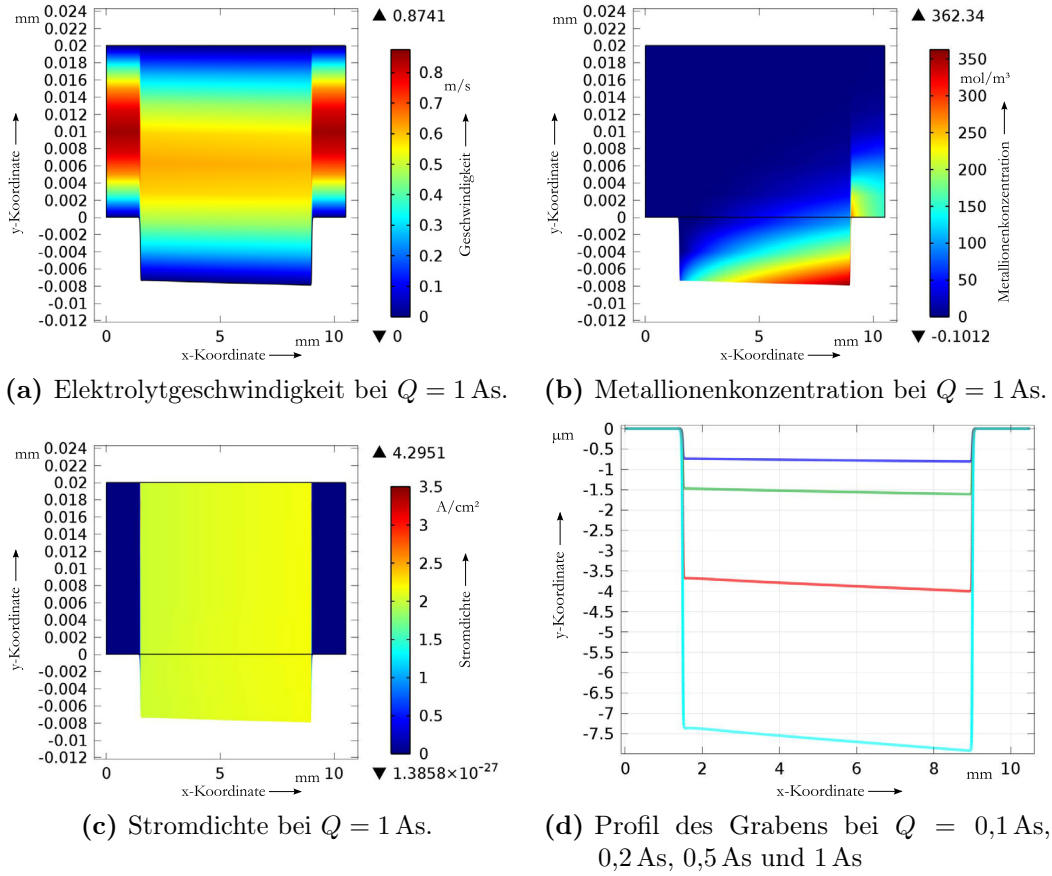


Abbildung A.8. Kanalhöhe $H_{Kanal} = 20 \mu\text{m}$, Stromdichte $J = 2 \text{ A/cm}^2$, Druck $p_{in} = 1,0 \text{ bar}$.

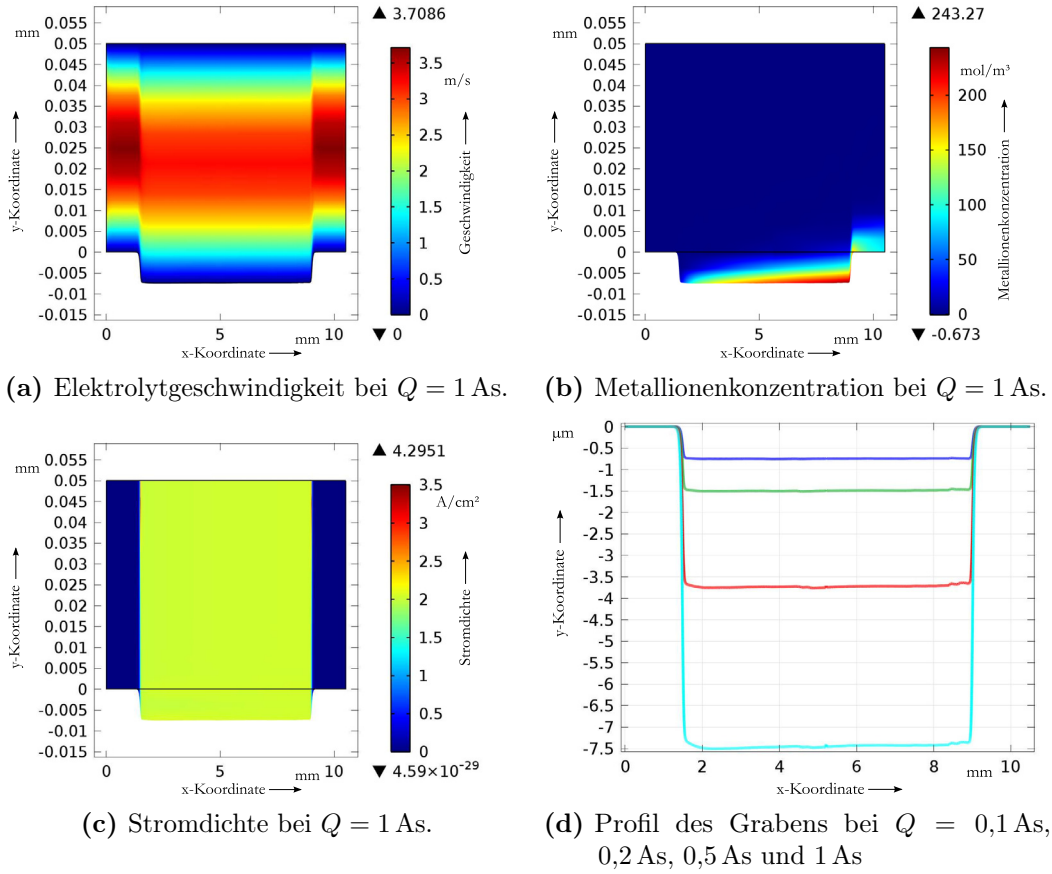


Abbildung A.9. Kanalhöhe $H_{Kanal} = 50 \mu\text{m}$, Stromdichte $J = 2 \text{ A/cm}^2$, Druck $p_{in} = 1,0 \text{ bar}$.

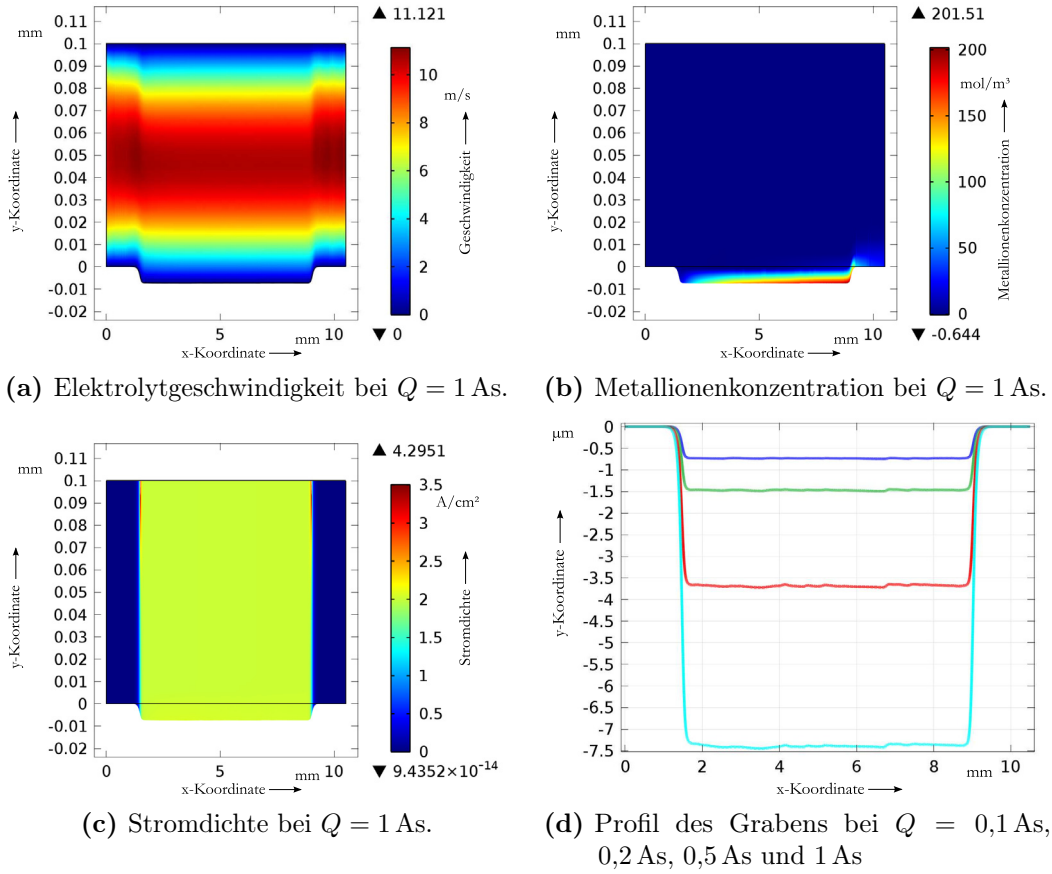


Abbildung A.10. Kanalhöhe $H_{Kanal} = 100 \mu\text{m}$, Stromdichte $J = 2 \text{ A/cm}^2$, Druck $p_{in} = 1,0 \text{ bar}$.

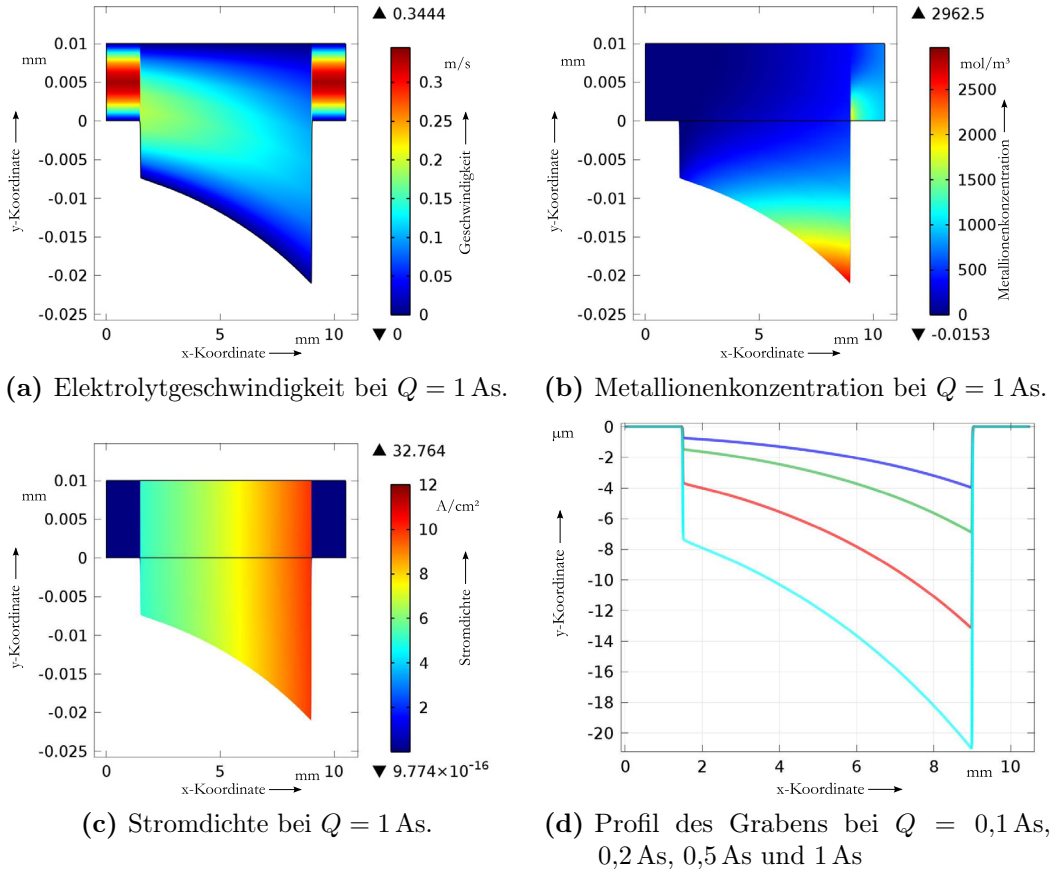


Abbildung A.11. Kanalhöhe $H_{Kanal} = 10 \mu\text{m}$, Stromdichte $J = 5 \text{ A/cm}^2$, Druck $p_{in} = 1,0 \text{ bar}$.

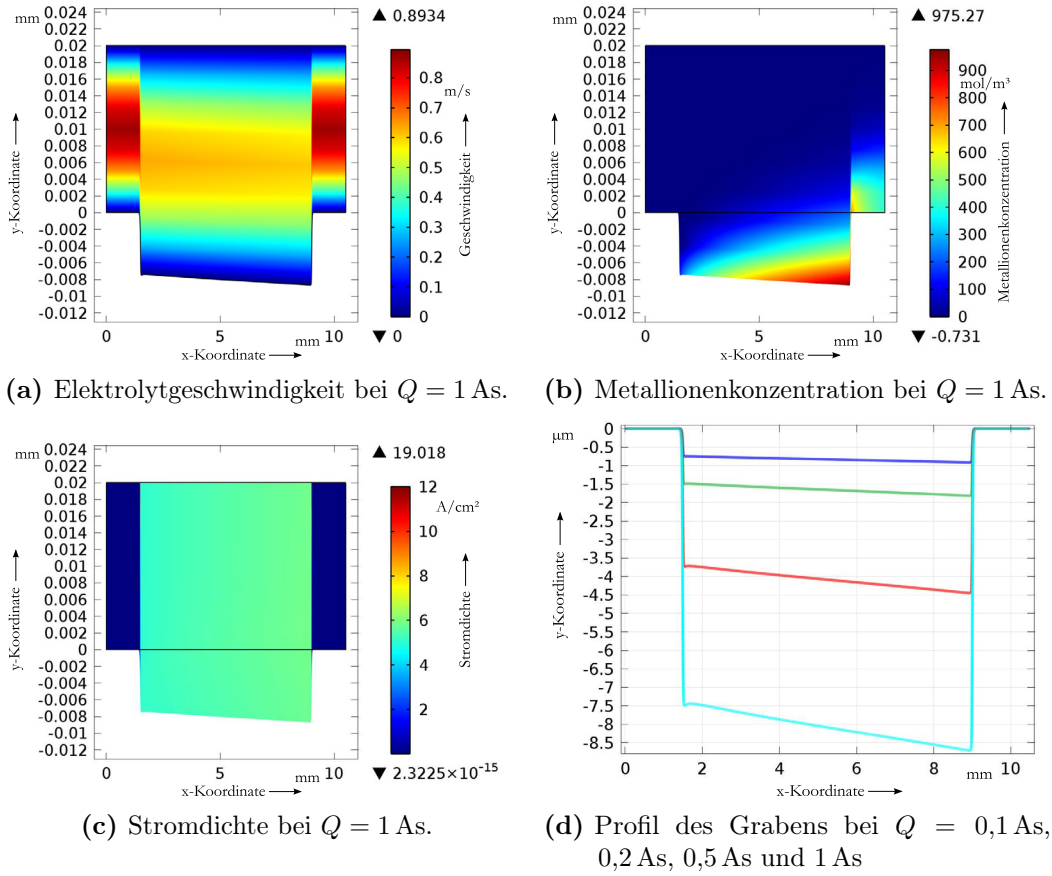


Abbildung A.12. Kanalhöhe $H_{Kanal} = 20 \mu\text{m}$, Stromdichte $J = 5 \text{ A/cm}^2$, Druck $p_{in} = 1,0 \text{ bar}$.

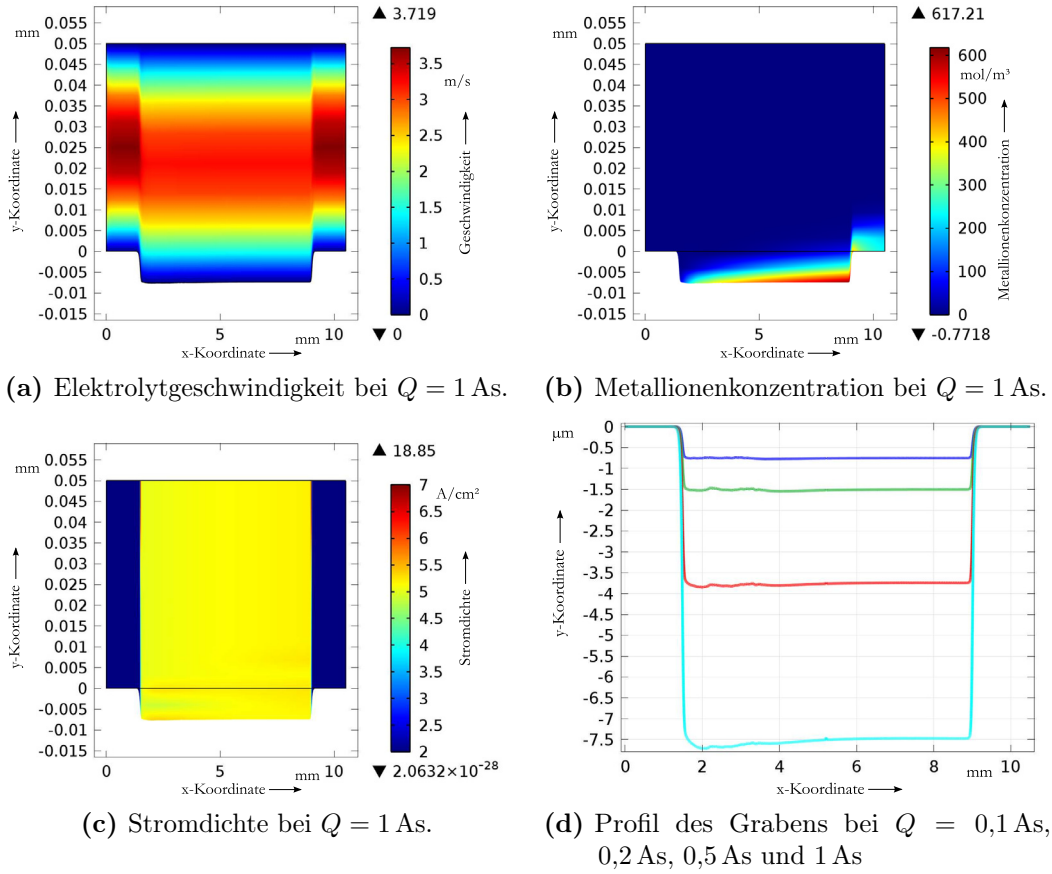


Abbildung A.13. Kanalhöhe $H_{Kanal} = 50 \mu\text{m}$, Stromdichte $J = 5 \text{ A/cm}^2$, Druck $p_{in} = 1,0 \text{ bar}$.

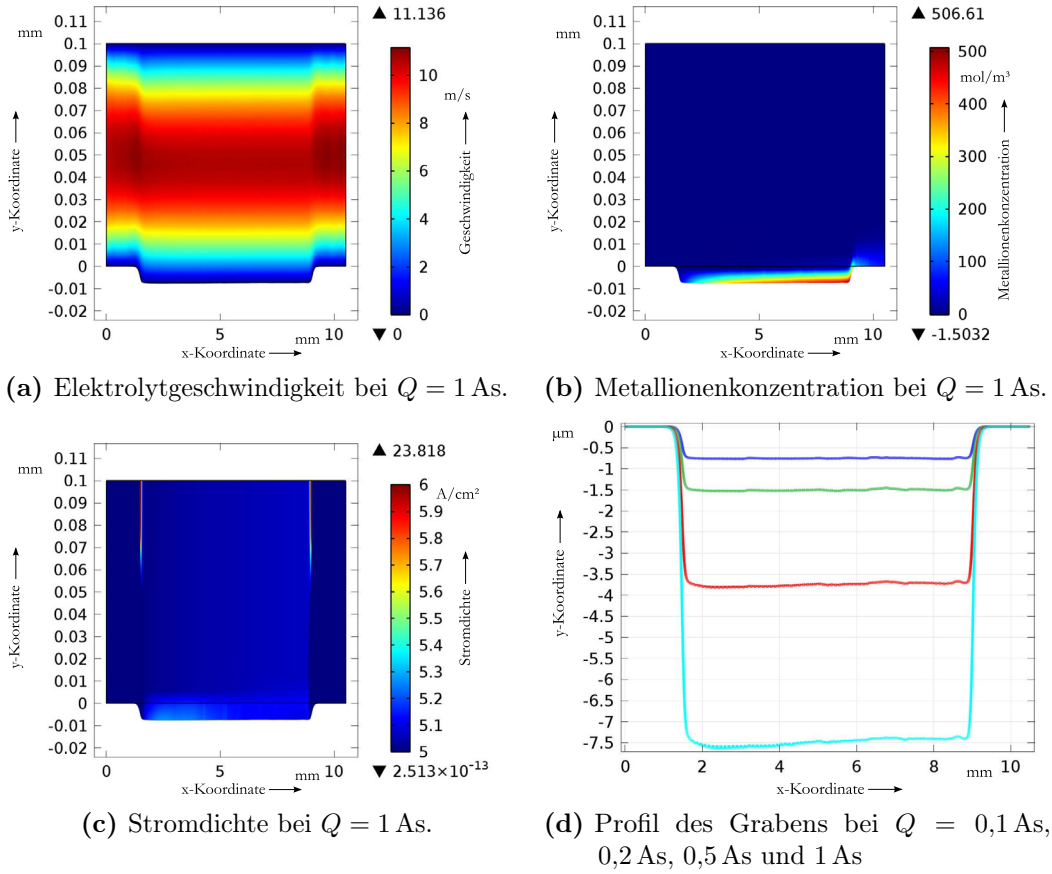


Abbildung A.14. Kanalhöhe $H_{Kanal} = 100 \mu\text{m}$, Stromdichte $J = 5 \text{ A/cm}^2$, Druck $p_{in} = 1,0 \text{ bar}$.

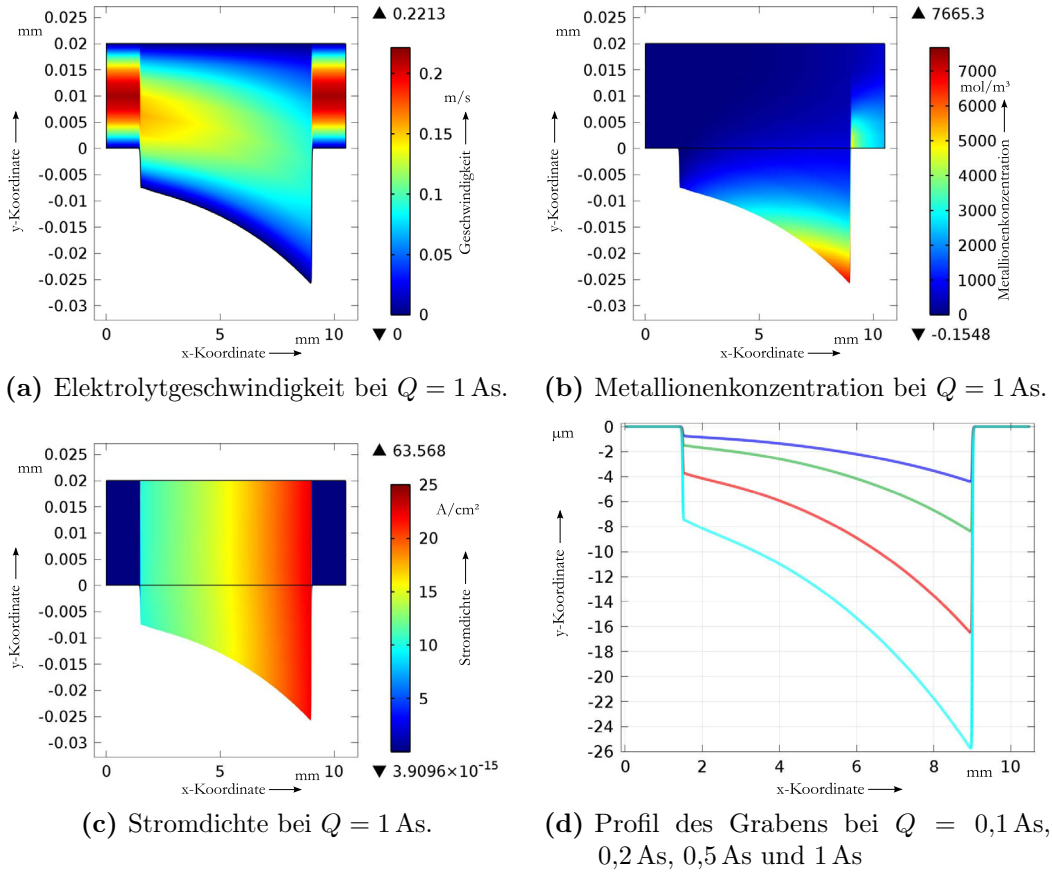


Abbildung A.15. Kanalhöhe $H_{Kanal} = 20 \mu\text{m}$, Stromdichte $J = 10 \text{ A/cm}^2$, Druck $p_{in} = 0,2 \text{ bar}$.

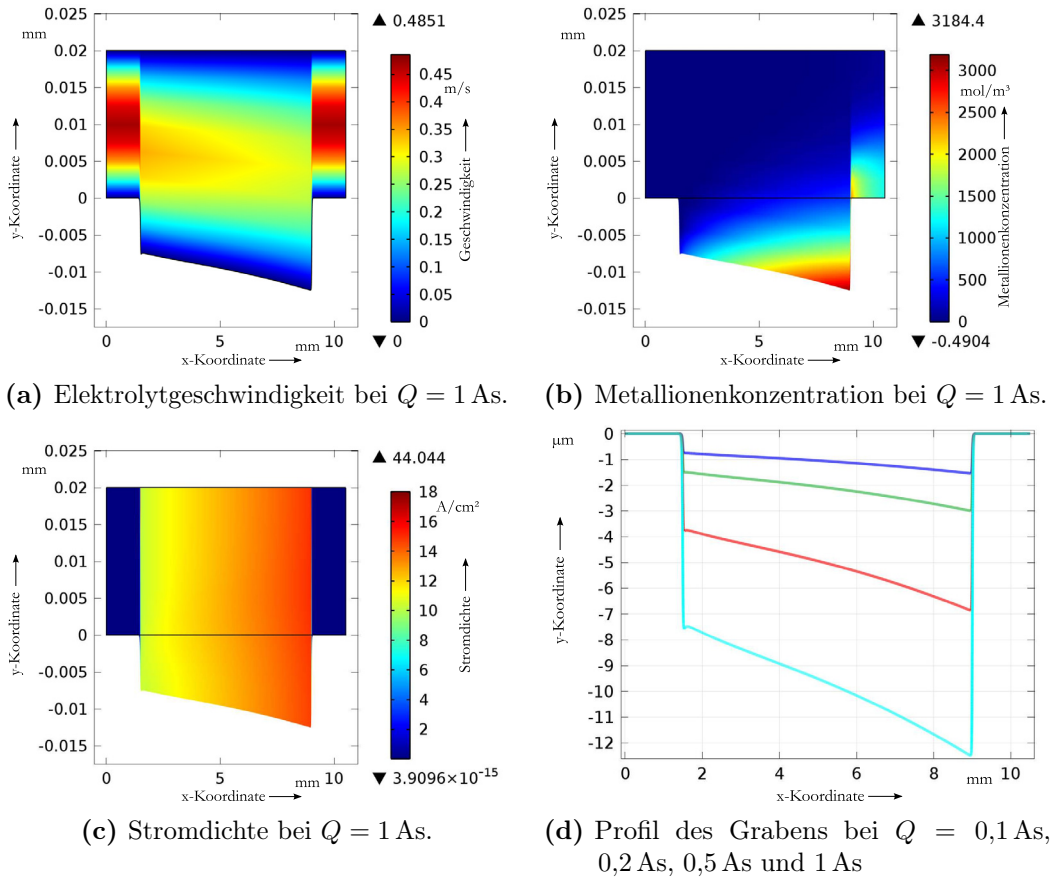


Abbildung A.16. Kanalhöhe $H_{Kanal} = 20 \mu\text{m}$, Stromdichte $J = 10 \text{ A/cm}^2$, Druck $p_{in} = 0,5 \text{ bar}$.

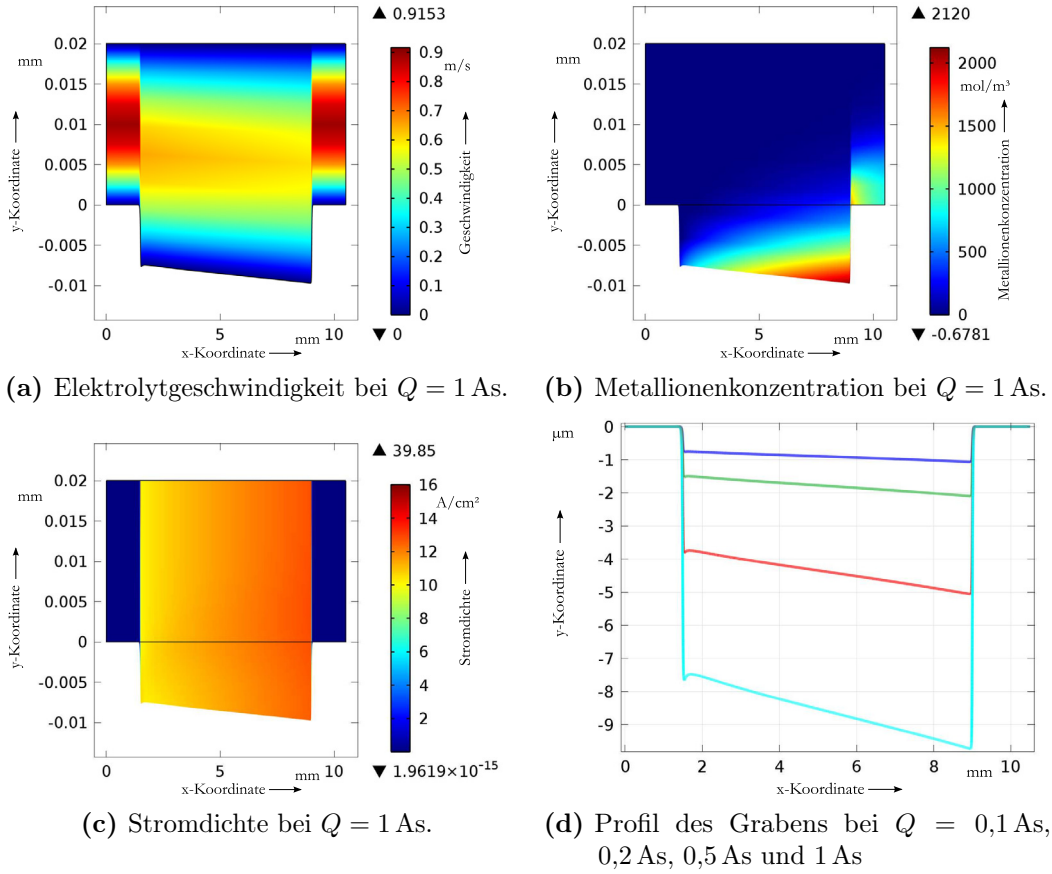


Abbildung A.17. Kanalhöhe $H_{Kanal} = 20 \mu\text{m}$, Stromdichte $J = 10 \text{ A/cm}^2$, Druck $p_{in} = 1,0 \text{ bar}$.

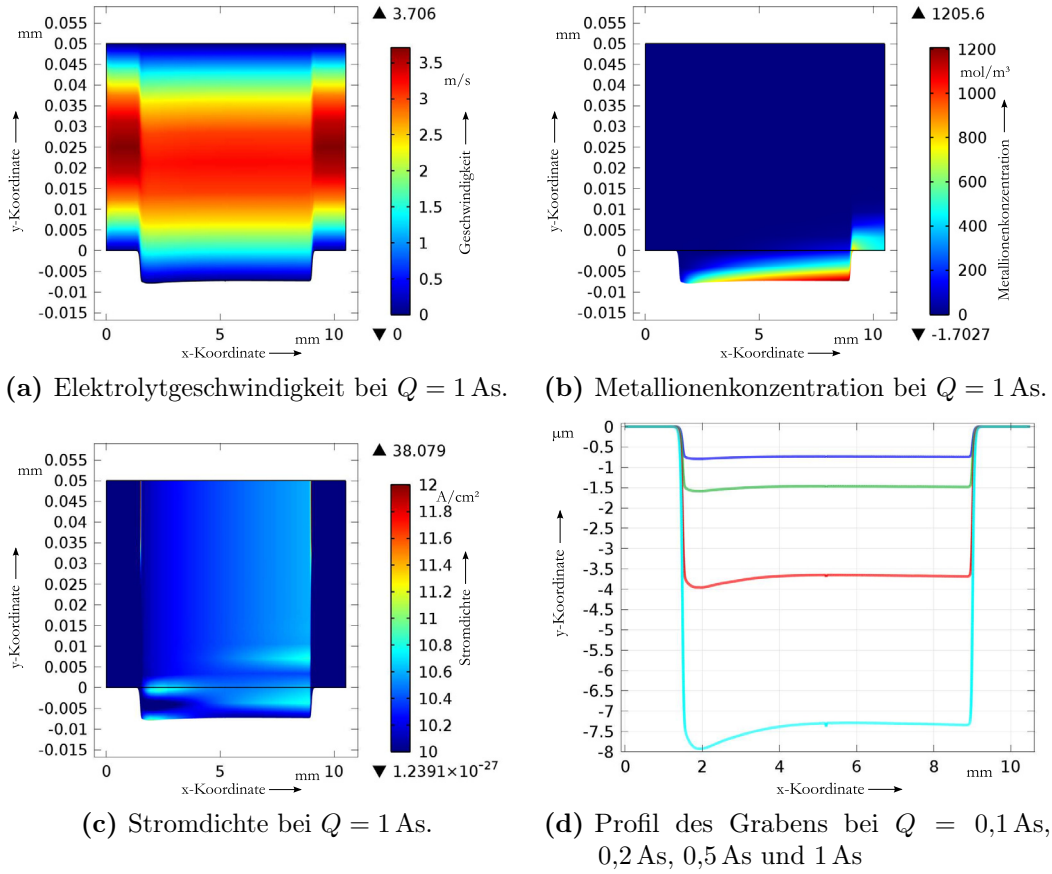


Abbildung A.18. Kanalhöhe $H_{Kanal} = 50 \mu\text{m}$, Stromdichte $J = 10 \text{ A/cm}^2$, Druck $p_{in} = 1,0 \text{ bar}$.

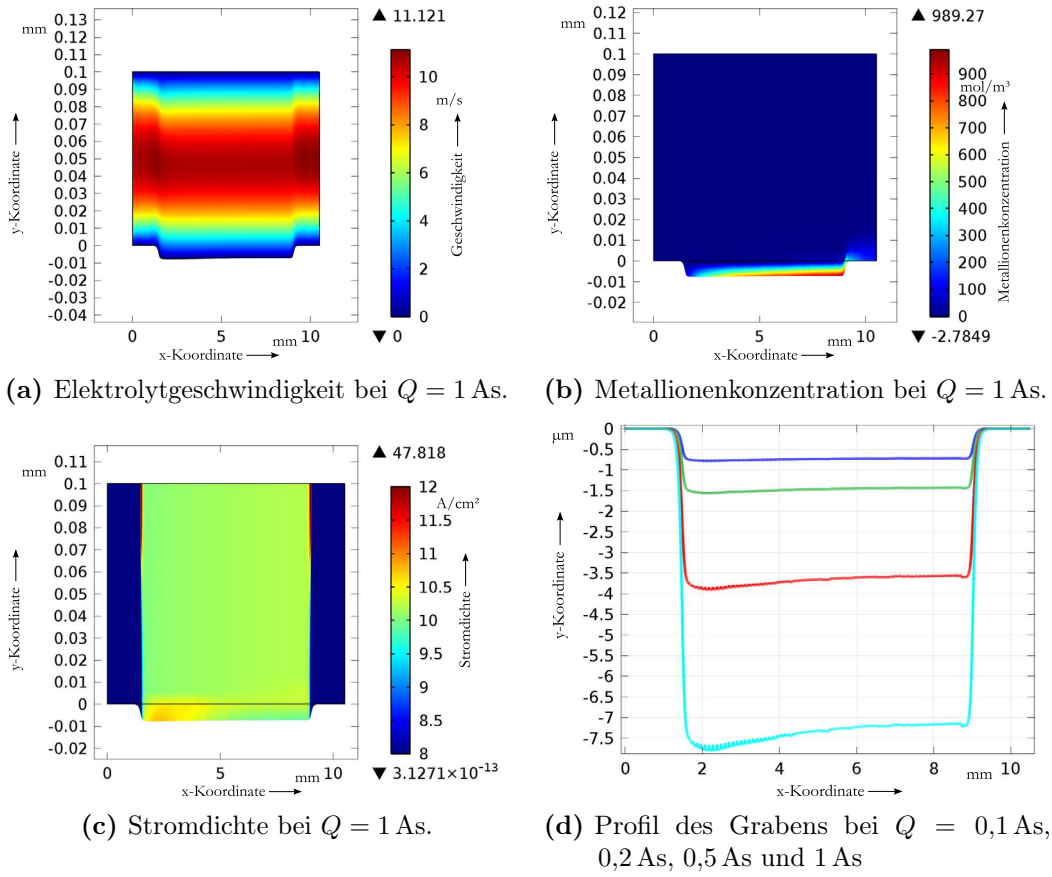


Abbildung A.19. Kanalhöhe $H_{Kanal} = 100 \mu\text{m}$, Stromdichte $J = 10 \text{ A/cm}^2$, Druck $p_{in} = 1,0 \text{ bar}$.

A.3.2. Strukturauflösung

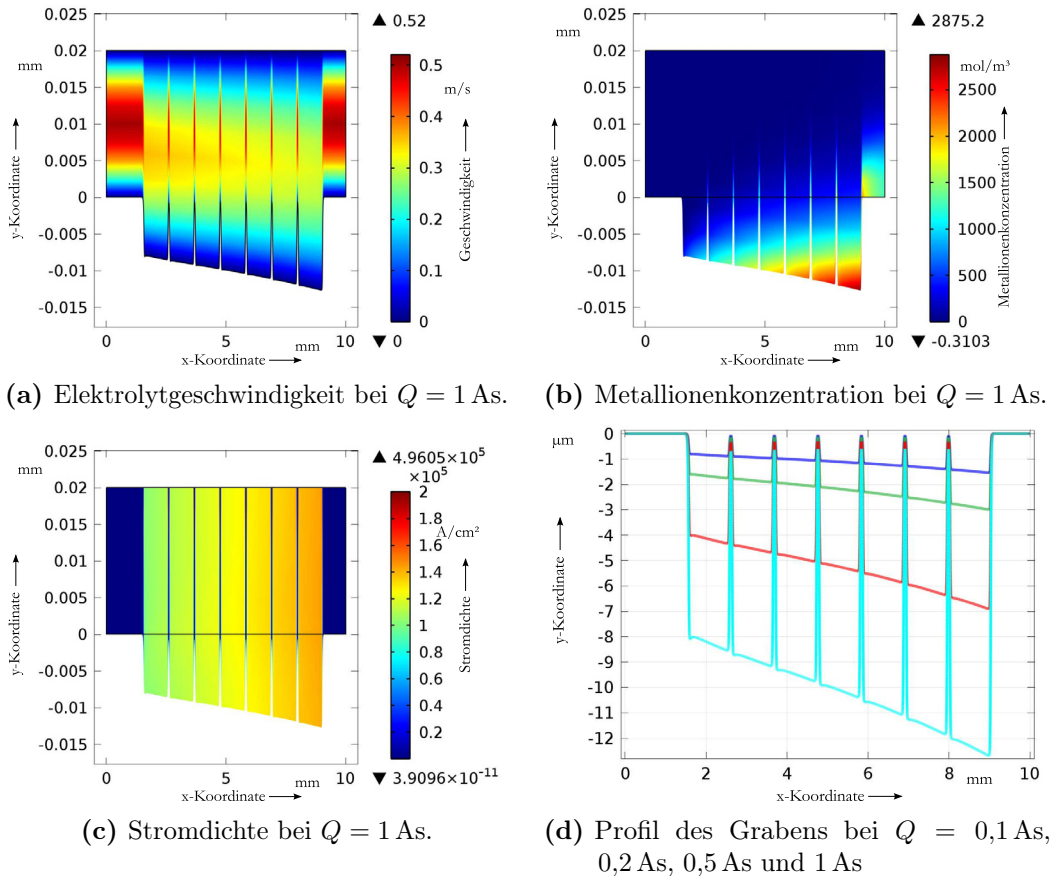


Abbildung A.20. Kanalhöhe $H_{Kanal} = 20$ μ m, Stromdichte $J = 10$ A/cm², Druck $p_{in} = 0,5$ bar.

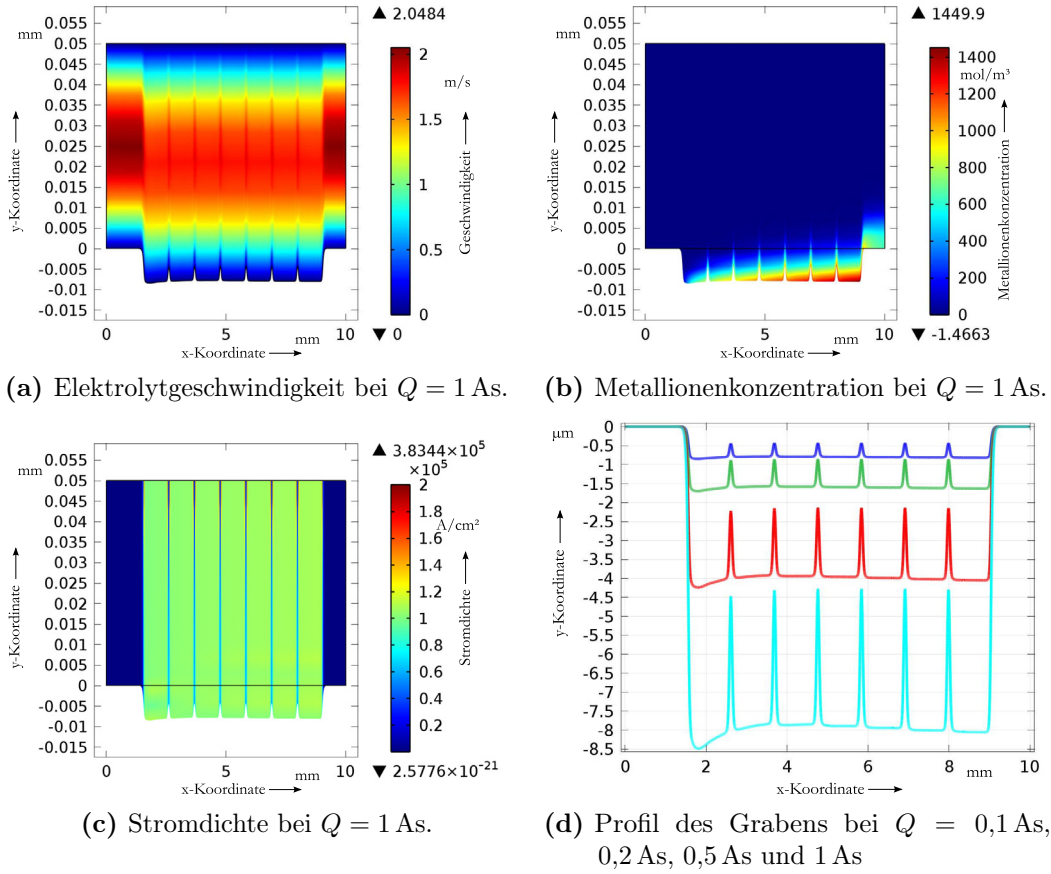


Abbildung A.21. Kanalhöhe $H_{Kanal} = 50$ μ m, Stromdichte $J = 10$ A/cm², Druck $p_{in} = 0,5$ bar.

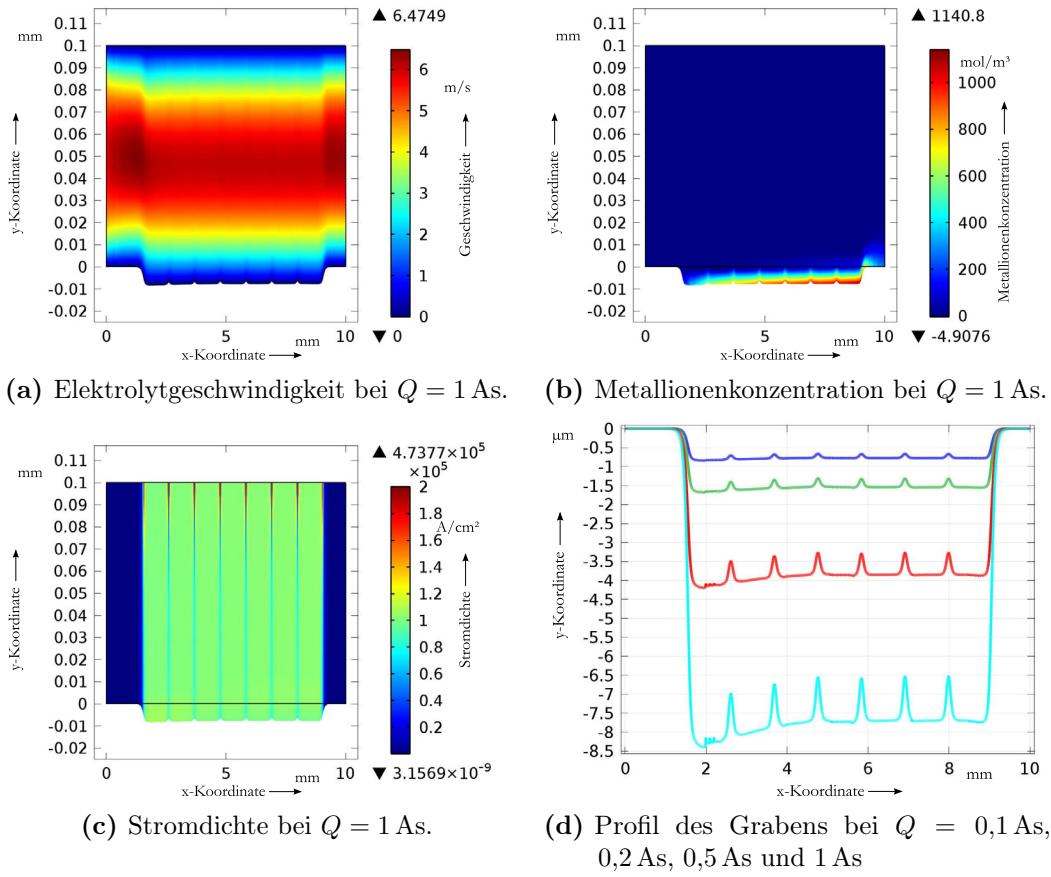


Abbildung A.22. Kanalhöhe $H_{Kanal} = 100 \mu\text{m}$, Stromdichte $J = 10 \text{ A/cm}^2$, Druck $p_{in} = 0,5 \text{ bar}$.

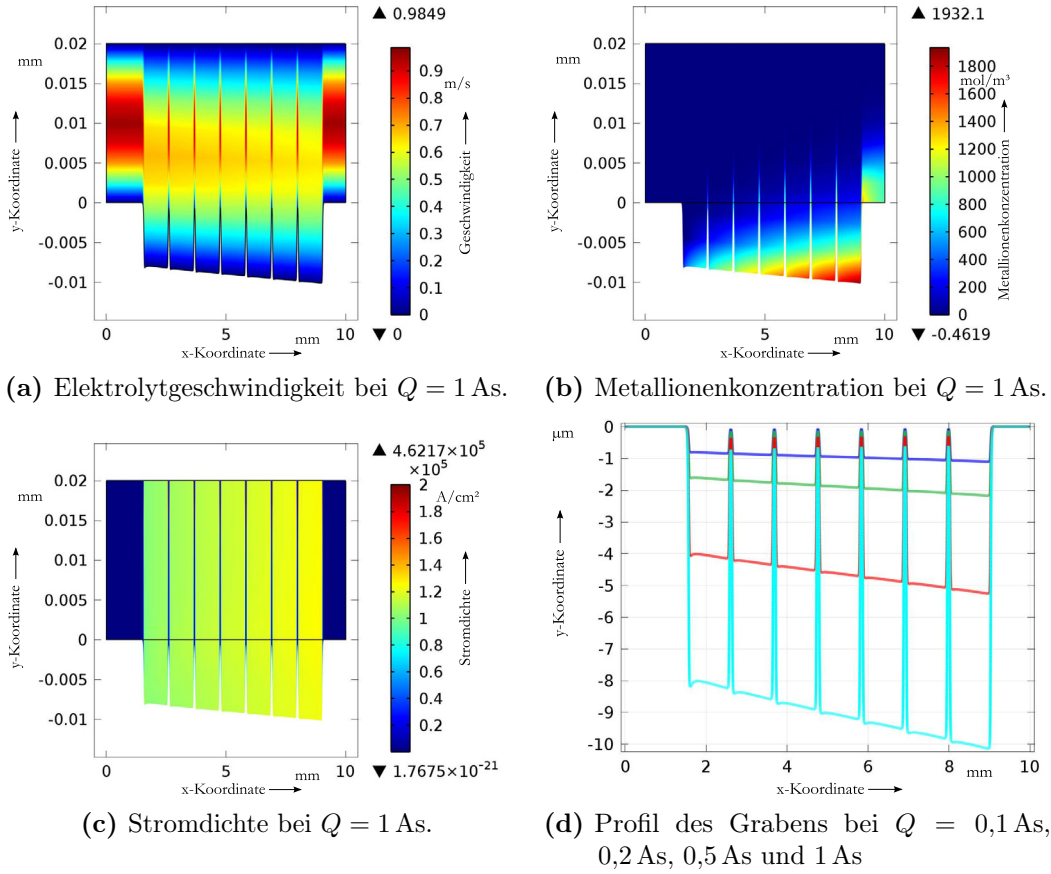


Abbildung A.23. Kanalhöhe $H_{Kanal} = 20 \mu\text{m}$, Stromdichte $J = 10 \text{ A/cm}^2$, Druck $p_{in} = 1,0 \text{ bar}$.

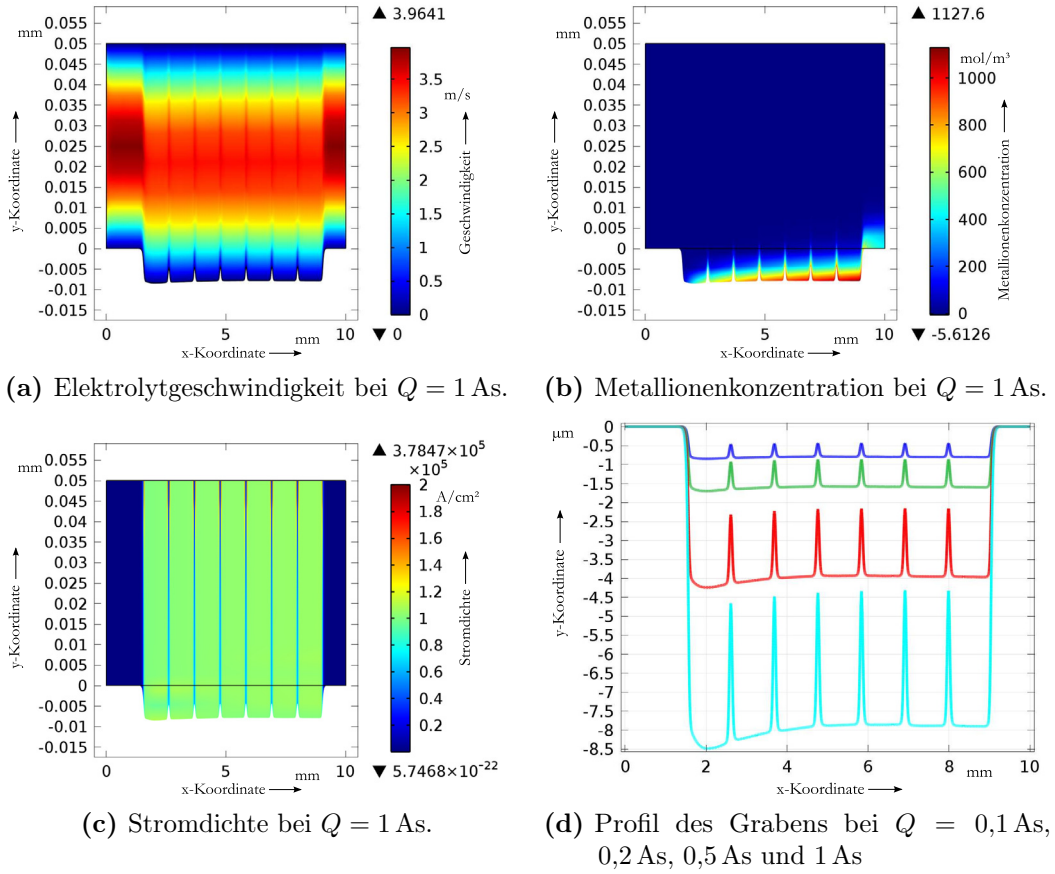


Abbildung A.24. Kanalhöhe $H_{Kanal} = 50$ μ m, Stromdichte $J = 10$ A/cm², Druck $p_{in} = 1,0$ bar.

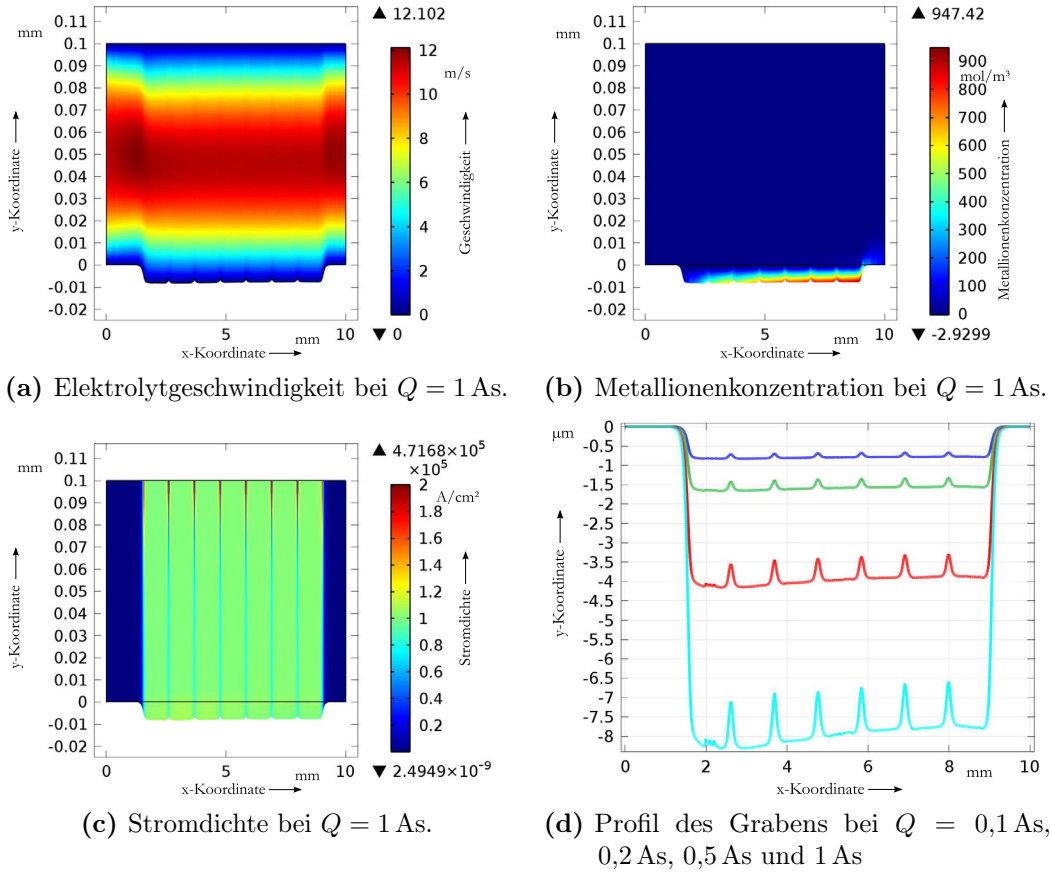





Abbildung A.25. Kanalhöhe $H_{Kanal} = 100 \mu\text{m}$, Stromdichte $J = 10 \text{ A/cm}^2$, Druck $p_{in} = 1,0 \text{ bar}$.

A.4. Laufzettel

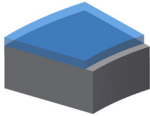
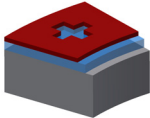
A.4.1. Sensorisches Lager

Tabelle A.1. Herstellung eines sensorischen Lagers.

Nr.	Tätigkeit	Material	Anlage/Medium	Parameter	Abbildung
1	Los Gründen	Wellenscheibe WS81111-TV			
2	Reinigung	Stahl	Petroleumbenzin, Ace- ton, Isopropanol	Entfettung	
3	Polieren	Stahl	Polieranlage <i>Logitech</i> <i>PM5</i>	Medium: Kollodiale SiO ₂ -Suspension, 0,04 µm Partikelgröße Poliertuch: Poröses Neopren Dauer: Auf Sicht, etwa 20 min bis 50 min	

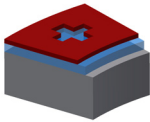
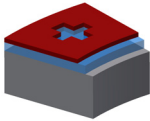
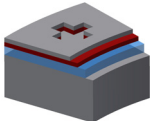

Fortsetzung auf nächster Seite

Tabelle A.1. Herstellung eines sensorischen Lagers. – *Fortsetzung*

Nr.	Tätigkeit	Material	Anlage/Medium	Parameter	Abbildung
4	Sputtern	500 nm Al_2O_3	Sputteranlage <i>Balzars Ardenne</i>	<p>Ätzen: Restdruck $<1,2 \times 10^{-6}$ mbar Argonfluss 100 sccm Ätzleistung 200 W Dauer 60 s Biasspannung 690 V Sputtern 470 nm Al_2O_3: Restdruck $<4,4 \times 10^{-7}$ mbar Argonfluss 106 sccm Sputterleistung 400 W Dauer 4800 s Biasspannung 424 V</p>	
5	Lithographie	10 μm <i>AZ 4562</i> , verdünnt mit 1-Methoxy-2-Propylacetat (1:1)	Sprühbelackung	<p>Belackung: Zunächst Rückseite Belacken, nach dem Ausheizen Vorderseite Prebake: Ofen 90 °C Dauer 45 min Belichtung: Hard Contact 35 s (Folienmaske) Entwicklung: <i>AZ 400K</i> auf Sicht Postbake: Ofen 70 °C Dauer 30 min</p>	

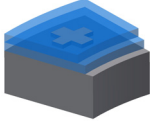
Fortsetzung auf nächster Seite

Tabelle A.1. Herstellung eines sensorischen Lagers. – *Fortsetzung*

Nr.	Tätigkeit	Material	Anlage/Medium	Parameter	Abbildung
6	Oberflächen-aktivierung	Al ₂ O ₃	Sauerstoffplasma	Leistung 500 W Dauer 30 s	
7	Ätzung	100 nm Al ₂ O ₃	Phosphorsäure 85 %	Temperatur 55 °C Dauer 2 min 38 s	
8	Sputtern	100 nm Titan	Sputteranlage <i>Balzers Ardenne</i>	Ätzen: Kein Sputterätzen Sputtern 100 nm Ti: Restdruck $< 8 \times 10^{-7}$ mbar Argonfluss 80 sccm Sputterleistung 100 W Dauer 1000 s Biasspannung 70 V	
9	Liftoff	<i>AZ 4562</i> mit Ti	Aceton	In Petrischale auf Sicht	

Fortsetzung auf nächster Seite

Tabelle A.1. Herstellung eines sensorischen Lagers. – *Fortsetzung*

Nr.	Tätigkeit	Material	Anlage/Medium	Parameter	Abbildung
10	Sputtern	500 nm Al ₂ O ₃	Sputteranlage Ardenne	Balzers Ätzen: Restdruck $<1,2 \times 10^{-6}$ mbar Argonfluss 100 sccm Ätzleistung 200 W Dauer 60 s Biasspannung 690 V Sputtern 470 nm Al ₂ O ₃ : Restdruck $<4,4 \times 10^{-7}$ mbar Argonfluss 106 sccm Sputterleistung 400 W Dauer 4800 s Biasspannung 424 V	

A.5. Füllung des fluidischen Kanals mit Metallionen

Zur Bestimmung der Zeit, die ein gelöstes Metallion von der Anode benötigt, um zur Kathode zu gelangen, wurde ein Vorversuch durchgeführt. Die dafür verwendete Gegenelektrode vom Typ 1a (siehe Seite 79) hat eine $450\text{ }\mu\text{m}$ breite und $7,5\text{ mm}$ lange leitfähige Fläche; ihr fluidischer Kanal ist $10,5\text{ mm}$ lang, 2 mm breit und $20\text{ }\mu\text{m}$ hoch. Der Elektrolyt fließt mit etwa 1 m/s durch den Kanal. Die Stromdichte beträgt 50 A/cm^2 , wobei der Strom nicht gepulst wird.

Abbildung A.26 zeigt die Verläufe des Stroms und der Spannung. Durch die Regelung wird der Strom konstant gehalten, sodass sich die Spannung ändern kann, wenn sich der elektrische Widerstand des fluidischen Kanals ändert. Am Anfang des Pulses folgt die Spannung dem Strom zunächst, um jedoch kurz darauf stark abzufallen und auf einem niedrigen Niveau zu verbleiben. Es lassen sich vier Phasen identifizieren:

1. $0,0\text{ s}$ bis $5,0\text{ s}$: Strom und Spannung sind jeweils null. Nur der Elektrolyt fließt.
2. $5,0\text{ s}$ bis $6,2\text{ s}$: Der Strom wird eingeschaltet. Aufgrund des kapazitiven Verhaltens der Doppelschichten folgt die elektrische Spannung verzögert. Metallionen beginnen sich von dem Werkstück zu lösen.
3. $6,2\text{ s}$ bis $7,0\text{ s}$: Die Spannung bricht schlagartig ein. Die Metallionenkonzentration im Kanal steigt stark an, der elektrische Widerstand sinkt dadurch.
4. $7,0\text{ s}$ bis $9,0\text{ s}$: Das Absinken der Spannung verlangsamt sich. Auf der Oberfläche des Werkstücks befinden sich nun so viele gelöste Metallionen, dass sie die Lösung weiterer Ionen verlangsamt.
5. $9,0\text{ s}$ bis $15,0\text{ s}$: Zwischen der Lösungsrate der Metallionen, der Anzahl der Metallionen im Kanal und der Transportgeschwindigkeit durch den Elektrolyten stellt sich ein Gleichgewicht ein und die Spannung verbleibt auf einem nahezu konstanten Wert.

Aus dem Verhalten des Spannungsverlaufes lässt sich folgern, dass mit dem Einbruch der Spannung in Phase 3 ($1,2$ Sekunden nach dem Einschalten des Stroms) die ersten Metallionen die Kathode erreichen und es dort zur Materialabscheidung kommt. Die Geschwindigkeit der Ionen im Kanal beträgt demnach in der Anfangsphase

$$v_{Ion} = \frac{20\text{ }\mu\text{m}}{1,2\text{ s}} = 16,7\text{ }\mu\text{m/s} \quad . \quad (\text{A.1})$$

Mit zunehmender Zeit verstärkt sich die Materialabscheidung. Um diese für eine möglichst lange Lebensdauer der Gegenelektrode zu verhindern, muss der Prozess so geführt werden, dass sich die Metallionen so langsam in Richtung Kathode bewegen, dass sie diese während ihrer Zeit im Kanal nicht erreichen können. Zwar fällt durch das Sinken des elektrischen Widerstands auch die Spannung und damit auch die Diffusionsgeschwindigkeit der Metallionen. Um gleichzeitig aber eine hohe Stromdichte beibehalten zu können, bleibt nur die Pulsung des elektrischen Stroms.

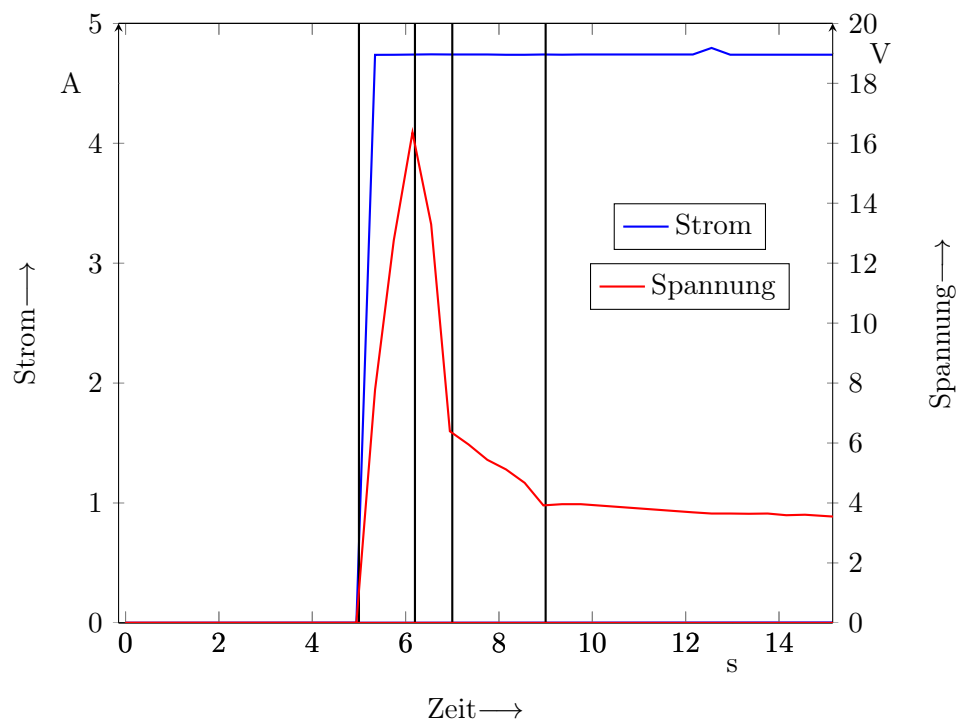


Abbildung A.26. Verlauf von Strom und Spannung zur Bestimmung der Ionengeschwindigkeit.

A.6. Elektronik

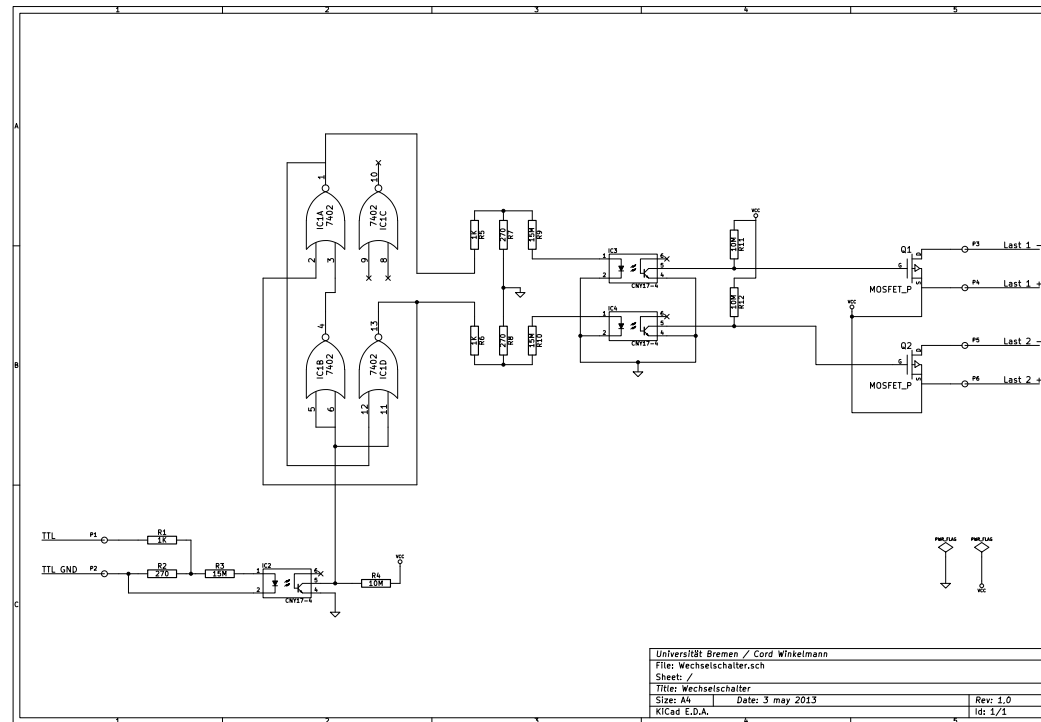


Abbildung A.27. Schaltplan des Wechselschalters

Literaturverzeichnis

- [1] LANG, W. ; JAKOBS, F. ; TOLSTOSHEEVA, E. ; STURM, H. ; IBRAGIMOV, A. ; KESEL, A. ; LEHMHUS, D. ; DICKE, U.: From embedded sensors to sensorial materials -The road to function scale integration. In: *Sensors and Actuators A: Physical* 171(1) (2011), S. 3–11
- [2] WINKELMANN, C. ; WOITSCHACH, O. ; MEYER, E.-M. ; LANG, W.: Development of a strain sensor for rolling contact loads. In: *Proceedings of Transducers 2011 IEEE*, 2011, S. 1080–1083
- [3] LANG, W. ; BOLL, D. ; TOLSTOSHEEVA, E. ; IBRAGIMOV, A. ; SCHUBERT, K. ; BRAUNER, C. ; PILLE, C.: Embedding without disruption: The basic challenge of sensor integration. In: *IEEE Sensors*, 2012, S. 1–4
- [4] BOLL, D. ; TOLSTOSHEEVA, E. ; SCHUBERT, K. ; BRAUNER, C. ; LANG, W.: Flexible Interdigital Sensor for Dielectric Cure Monitoring of Composites. In: *DEWEK 2012*, 2012
- [5] IBRAGIMOV, A. ; LANG, W.: Micromachined thermogenerator for high-temperature applications. In: *PowerMEMS 2011*, 2011
- [6] IBRAGIMOV, A. ; PLETEIT, H. ; PILLE, C. ; LANG, W.: A Thermoelectric Energy Harvester Directly Embedded Into Casted Aluminum. In: *Electron Device Letters, IEEE* 33 (2012), Nr. 2, S. 233–235
- [7] JARDINE, Andrew K. ; LIN, Daming ; BANJEVIC, Dragan: A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. In: *Mechanical systems and signal processing* 20 (2006), Nr. 7, 1483–1510. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0888327005001512>
- [8] BIEHL, Saskia ; LUETHJE, Holger ; BANDORF, Ralf ; SICK, Jan-Hinrich: Multi-functional thin film sensors based on amorphous diamond-like carbon for use in tribological applications. In: *Thin Solid Films* 515 (2006), NOV 25, Nr. 3, S. 1171–1175. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tsf.2006.07.143>. – DOI 10.1016/j.tsf.2006.07.143. – ISSN 0040–6090. – 33rd International Conference on Metallurgical Coatings and Thin Films, San Diego, CA, MAY 01-05, 2006
- [9] TIBREWALA, A ; PEINER, E ; BANDORF, R ; BIEHL, S ; LÜTHJE, H: Transport and optical properties of amorphous carbon and hydrogenated amorphous carbon films. In: *Applied surface science* 252 (2006), Nr. 15, 5387–5390. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169433205017113>

- [10] BRÄUER, G. ; BANDORF, R. ; BIEHL, S. ; DIETZ, A. ; LÜTHJE, H. ; VERGÖHL, M.: Smart Coatings for Intelligent Surfaces. In: *Vakuum in Forschung und Praxis* 20 (2008), Nr. S1, 34–37. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/vipr.200890038/abstract>
- [11] BANDORF, R. ; GERDERS, H. ; HECKMANN, U. ; PETERSEN, M. ; BRÄUER, G.: Hochempfindliche Dünnschicht-Dehnungsmessstreifen auf technischen Bauteilen. In: *Proceedings of 16. GMA/ITG-Fachtagung Sensoren und Messsysteme 2012* (2012), S. 423–434
- [12] MIHARA, Y. ; SOMEYA, T.: A study on the development of a thin-film pressure sensor. In: *Tribological Research and Design For Engineering Systems* 2 (2002), S. 954–959 vol.2
- [13] BRECHER, C. ; ROSSAINT, J. ; BONERZ, S.: Messtechnik - Drahtlose Messung im Hochdrehzahlbereich. In: *Konstruktion - Zeitschrift für Produktentwicklung* 64 (2012), Nr. 3, S. 74
- [14] SPUR, G. ; THOMAS, V. ; LIEWALD, M. ; STRAUBE, O.: Regelung des Tiefziehprozesses in der Pressteilefertigung mit dem Blechkanteneinlauf als Regelgröße. In: *Blech Rohre Profile* 41 (1994), S. 237–240
- [15] LIEWALD, M. ; SPUR, G. ; STRAUBE, O.: *Verfahren zum Betreiben von Ziehpressen sowie hierzu geeignete Ziehpresse*. 1996
- [16] NEUGEBAUER, R. ; BRÄUNLICH, H. ; SCHEFFLER, S.: Process monitoring and closed loop controlled process. In: *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 9 (2009), S. 105–126
- [17] BIEHL, S. ; STAUFENBIEL, S. ; HAUSCHILD, F. ; ALBERT, A.: Novel measurement and monitoring system for forming processes based on piezoresistive thin film systems. In: *Microsystem Technologies* 16 (2010), S. 879–883. <http://dx.doi.org/10.1007/s00542-010-1058-0> – DOI 10.1007/s00542-010-1058-0
- [18] WANG, Da-Yung ; CHANG, Chi-Lung ; HO, Wei-Yu: Oxidation behavior of diamond-like carbon films. In: *Surface and Coatings Technology* 120-121 (1999), S. 138144
- [19] ZHANG, Sam ; BUI, Xuan L. ; LI, Xiaomin: Thermal stability and oxidation properties of magnetron sputtered diamond-like carbon and its nanocomposite coatings. In: *Diamond & Related Materials* 15 (2006), S. 972–976
- [20] KRAUSE, A. ; KACHE, H. ; ULLMANN, G.: In-situ detection of forging defects without sensors in the forging tool. In: *Proc. AMPT 2012 International conference on advances in materials & processing technologies*, 2012
- [21] KRAUSE, A. ; STONIS, M. ; BEHRENS, B.-A.: Sensorlose Prozessüberwachung von Schmiedeprozessen. In: *Proc. MEFORM 2012 Werkstofftechnologie und Umformtechnik*. Freiberg, 2012, S. 191–201

- [22] KUNIEDA, M. ; LAUWERS, B. ; RAJURKAR, K. P. ; SCHUMACHER, B. M.: Advancing EDM through Fundamental Insight into the Process. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 54 (2005), S. 64–87
- [23] KIM, B. H. ; PARK, B. J. ; CHU, C. N.: Fabrication of multiple electrodes by reverse EDM and their application in micro ECM. In: *Journal of Micromechanics and Microengineering* 16 (2006), Nr. 4, S. 843–850. <http://dx.doi.org/10.1088/0960-1317/16/4/022>. – DOI 10.1088/0960-1317/16/4/022
- [24] MASUZAWA, T. ; FUJINO, M. ; KOBAYASHI, K.: Wire Electro-Discharge Grinding for Micro-Machining. In: *Annals of the CIRP* 34,1 (1985), S. 421–434
- [25] MASUZAWA, T.: State of the Art of Micromachining. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 49 (2000), S. 473–488
- [26] MASAKI, T. ; KAWATA, K. ; MASUZAWA, T.: Batch mode micro-electro-discharge machining. In: *Proc. IEEE MEMS*, 1990, S. 21–26
- [27] TAKAHATA, K. ; GIANCHANDANI, Y.B.: Batch mode micro-EDM for high-density and high-throughput micromachining. In: *Proc. 14th IEEE Intl Conf. Micro Electro Mechanical Systems (MEMS 2001)*, 2001, S. 72–75
- [28] PARK, B. J. ; KIM, B. H. ; CHU, C. N.: The effects of tool electrode size on characteristics of micro electrochemical machining. In: *Cirp Annals - Manufacturing Technology* 55 (2006), Nr. 1, S. 197–200
- [29] PARK, B. J.: *Effects of tool electrode size on micro electrochemical machining using ultra short pulses*, Seoul National University, Diss., 2006
- [30] MASAKI, T. ; WADA, T.: Micro Electro Discharge Machining. In: *Journal of the Japan Society for Abrasive Technology* 46 (2002), Nr. 12, S. 610–613
- [31] YAMAZAKI, M. ; SUZUKI, T. ; MORI, N. ; KUNIEDA, M.: EDMing of Micro-Rods by Self-Drilled Holes. In: *Journal of Materials Processing Technology* 149 (2004), S. 134–138
- [32] YAMAZAKI, M. ; MORI, N. ; SUZUKI, T. ; M., Kunieda: Simultaneous Processing Method for Micro-Rods and Holes using EDM. In: *JSME International Journal Series C Mechanical Systems, Machine Elements and Manufacturing* 48 (2005), Nr. 2, S. 286–291
- [33] SUTTMANN, Oliver ; DUESING, J.F. ; KLUG, Ulrich ; KLING, Rainer: Patterning of NiCr(80/20) on Al₂O₃ Using Picosecond Laser Pulses. In: *Journal of Laser Micro/Nanoengineering* 6 (2011), Nr. 1, S. 31–36
- [34] <http://www.lzh.de/>

- [35] CHICHKOV, B. N. ; MOMMA, C. ; NOLTE, S. ; ALVENSLEBEN, F. von ; TÜNNERMANN, A.: Femtosecond, picosecond and nanosecond laser ablation of solids. In: *Applied Physics A* 63 (1996), Nr. 2, S. 109–115
- [36] NEDIALKOV, N.N ; IMAMOVA, S.E. ; ATANASOV, P.A. ; HEUSEL, G. ; BREITLING, D. ; RUF, A. ; HÜGEL, H. ; DAUSINGER, F. ; BERGER, P.: Laser ablation of iron by ultrashort laser pulses. In: *Thin Solid Films* 453-454 (2004), S. 496–500
- [37] MOMMA, C. ; NOLTE, S. ; CHICHKOV, B. N. ; ALVENSLEBEN, F. v. ; TÜNNERMANN, A.: Precise laser ablation with ultrashort pulses. In: *Applied Surface Science* 109-110 (1997), S. 15–19
- [38] NOLTE, S. ; MOMMA, C. ; JACOBS, H. ; TÜNNERMANN, A. ; CHICHKOV, B. N. ; WELLEGEHAUSEN, B.: Ablation of metals by ultrashort laser pulses. In: *Journal of the Optical Society of America* 14 (1997), S. 2716–2722. <http://dx.doi.org/http://dx.doi.org/10.1364/JOSAB.14.002716>. – DOI <http://dx.doi.org/10.1364/JOSAB.14.002716>
- [39] LINDE, D. von d. ; SOKOLOWSKI-TINTEN, K.: The physical mechanisms of short-pulse laser ablation. In: *Applied Surface Science* 154-155 (2000), S. 1–10
- [40] PREUSS, S. ; DEMCHUK, A. ; STUKE, M.: Sub-picosecond UV laser ablation of metals. In: *Applied Physics A* 61 (1995), S. 33–37
- [41] SHAHEEN, M. E. ; GAGNON, J. E. ; FRYER, B. J.: Laser ablation of iron: A comparison between femtosecond and picosecond laser pulses. In: *Journal of Applied Physics* 114 (2013), Nr. 8, S. 083110
- [42] SEMEROK, A. ; CHALÉARD, C. ; DETALLE, V. ; LACOUR, J.-L. ; MAUCHIEN, P. ; MEYNADIER, P. ; NOUVELLON, D. ; SALLÉ, B. ; PALIANOV, P. ; PERDRIX, M. ; PETITE, G.: Experimental investigations of laser ablation efficiency of pure metals with femto, pico and nanosecond pulses. In: *Applied Surface Science* 138-139 (1999), S. 311–314
- [43] GÜNTHER, D. ; HORN, I. ; HATTENDORF, B.: Recent trends and developments in laser ablation-ICP-mass spectrometry. In: *Fresenius' Journal of Analytical Chemistry* 368 (2000), S. 4–14
- [44] LIU, J. M.: Simple technique for measurements of pulsed Gaussian-beam spot sizes. In: *Optics Letters* 7 (1982), Nr. 5, S. 196–198
- [45] JEE, Yong ; BECKER, M. F. ; WALSER, R. M.: Laser-induced damage on single-crystal metal surfaces. In: *Journal of the Optical Society of America* 5 (1988), Nr. 3, S. 648–659
- [46] GÜDDE, J. ; HOHLFELD, J. ; MÜLLER, J. G. ; MATTHIAS, E.: Damage threshold dependence on electronphonon coupling in Au and Ni films. In: *Applied Surface Science* 127-129 (1998), S. 40–45

- [47] SIEGEL, J. ; MATTHIAS, E. ; ETTRICH, K. ; WELSCH, E.: UV-laser ablation of ductile and brittle metal films. In: *Applied Physics A* 64 (1997), S. 213–218
- [48] HOHLFELD, J. ; WELLERSHOFF, S.-S. ; GÜDDE, J. ; CONRAD, U. ; JÄHNKE, V. ; MATTHIAS, E.: Electron and lattice dynamics following optical excitation of metals. In: *Chemical Physics* 251 (2000), Nr. 1-3, S. 237–258
- [49] SUTTMANN, O. ; GOSSELIN, M. ; KLUG, U. ; KLING, R.: Picosecond laser patterning of NiCr thin film strain gages. In: *Proc. SPIE 7589, Frontiers in Ultrafast Optics: Biomedical, Scientific, and Industrial Applications X*, 2010
- [50] SUTTMANN, O. ; DUESING, J. ; KOCH, J. ; STUTE, U. ; OVERMEYER, L.: Patterning of thin film strain gauges on 3D-surfaces. In: *Proceedings SENSOR*, 2013, S. 34–37
- [51] SUTTMANN, O. ; KLUG, U. ; KLING, R.: On the damage behaviour of Al₂O₃ insulating layers in thin film systems for the fabrication of sputtered strain gauges. In: *Proc. SPIE 7925, Frontiers in Ultrafast Optics: Biomedical, Scientific, and Industrial Applications XI*, 2011
- [52] DUBBEL: *Handbuch für den Maschinenbau*. Springer, 2005
- [53] ROSENKRANZ, C. ; LOHRENGEL, M. M. ; SCHULTZE, J. W.: The surface structure during pulsed ECM of iron in NaNO₃. In: *Electrochimica Acta* 50 (2005), Nr. 10, S. 2009–2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.electacta.2004.09.010>. – DOI 10.1016/j.electacta.2004.09.010
- [54] BUHLERT, Magnus: *Elektropolieren - Elektrolytisches Glänzen, Glätten und Entgraten von Edelstahl, Stahl, Messing, Kupfer, Aluminium und Titan*. Bd. 1. Eugen G. Leuze Verlag, 2009. – 144 S.
- [55] KAESCHE, H.: *Die Korrosion der Metalle*. Berlin : Springer, 1979
- [56] LOHRENGEL, M. M. ; ROSENKRANZ, C. ; ROHRBECK, D.: The iron/electrolyte interface at extremely large current densities. In: *Microchimica Acta* 156 (2006), Nr. 1-2, S. 163–166. <http://dx.doi.org/10.1007/s00604-006-0594-x>. – DOI 10.1007/s00604-006-0594-x
- [57] BHATTACHARYYA, B. ; MUNDA, J. ; MALAPATI, M.: Advancement in electrochemical micro-machining. In: *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 44 (2004), DEC, Nr. 15, S. 1577–1589. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2004.06.006>. – DOI 10.1016/j.ijmachtools.2004.06.006. – ISSN 0890–6955
- [58] DATTA, M.: Fabrication of An Array of Precision Nozzles By Through-mask Electrochemical Micromachining. In: *Journal of the Electrochemical Society* 142 (1995), Nr. 11, S. 3801–3805

- [59] MADORE, C. ; PIOTROWSKI, O. ; LANDOLT, D.: Through-mask electrochemical micromachining of titanium. In: *Journal of the Electrochemical Society* 146 (1999), Nr. 7, S. 2526–2532
- [60] ROSSET, E. ; LANDOLT, D.: Experimental Investigation of Shape Changes In Electrochemical Micromachining Through Photoresist Masks. In: *Precision Engineering-journal of the American Society For Precision Engineering* 11 (1989), Nr. 2, S. 79–82. [http://dx.doi.org/doi:10.1016/0141-6359\(89\)90056-1](http://dx.doi.org/doi:10.1016/0141-6359(89)90056-1). – DOI doi:10.1016/0141-6359(89)90056-1
- [61] WEST, A. C. ; MATLOSZ, M. ; LANDOLT, D.: Normalized and Average Current Distributions On Unevenly Spaced Patterns. In: *Journal of the Electrochemical Society* 138 (1991), März, Nr. 3, S. 728–735. <http://dx.doi.org/http://dx.doi.org/10.1149/1.2085666>. – DOI <http://dx.doi.org/10.1149/1.2085666>
- [62] WEST, A. C. ; MADORE, C. ; MATLOSZ, M. ; LANDOLT, D.: Shape Changes During Through-mask Electrochemical Micromachining of Thin Metal-films. In: *Journal of the Electrochemical Society* 139 (1992), Nr. 2, S. 499–506
- [63] KWON, G. J. ; SUN, H. Y. ; SOHN, H. J.: Wall Profile Developments In Through-mask Electrochemical Micromachining of Invar Alloy-films. In: *Journal of the Electrochemical Society* 142 (1995), Nr. 9, S. 3016–3020
- [64] DIKUSAR, A. I. ; KELOGLU, O. Y. ; YUSCHENKO, S. P.: Shape evolution during through-mask electrochemical micromachining at low and high aspect ratio. In: *Cas'98 Proceedings - 1998 International Semiconductor Conference, 21st Edition, Vols 1 and 2* (1998), S. 557–560
- [65] DATTA, M. ; LANDOLT, D.: Fundamental aspects and applications of electrochemical microfabrication. In: *Electrochimica Acta* 45 (2000), Nr. 15-16, S. 2535–2558. [http://dx.doi.org/doi:10.1016/S0013-4686\(00\)00350-9](http://dx.doi.org/doi:10.1016/S0013-4686(00)00350-9). – DOI doi:10.1016/S0013-4686(00)00350-9
- [66] RAFFELSTETTER, P. ; MOLLAY, B.: On the modeling of shape evolution in through-mask electrochemical micromachining of complex patterned substrates. In: *Electrochimica Acta* 55 (2010), Nr. 6, S. 2149–2157. <http://dx.doi.org/10.1016/j.electacta.2009.11.049>. – DOI 10.1016/j.electacta.2009.11.049
- [67] KERN, P. ; VEH, J. ; MICHLER, J.: New developments in through-mask electrochemical micromachining of titanium. In: *Journal of Micromechanics and Microengineering* 17 (2007), Nr. 6, S. 1168–1177. <http://dx.doi.org/10.1088/0960-1317/17/6/010>. – DOI 10.1088/0960-1317/17/6/010
- [68] BHATTACHARYYA, B. ; DOLOI, B. ; SRIDHAR, P. S.: Electrochemical micro-machining: new possibilities for micro-manufacturing. In: *Journal of Materials Processing Technology* 113 (2001), Nr. 1-3, S. 301–305

- [69] BHATTACHARYYA, B. ; MUNDA, J.: Experimental investigation on the influence of electrochemical machining parameters on machining rate and accuracy in micro-machining domain. In: *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 43 (2003), Nr. 13, S. 1301–1310. [http://dx.doi.org/10.1016/S0890-6955\(03\)00161-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0890-6955(03)00161-5). – DOI 10.1016/S0890-6955(03)00161-5
- [70] BHATTACHARYYA, B. ; MUNDA, J.: Experimental investigation into electrochemical micromachining (EMM) process. In: *Journal of Materials Processing Technology* 140 (2003), S. 287–291. [http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136\(03\)00722-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00722-2). – DOI 10.1016/S0924-0136(03)00722-2
- [71] SCHUSTER, Rolf ; KIRCHNER, Viola ; ALLONGUE, Philippe ; ERTL, Gerhard: Electrochemical Micromachining. In: *Science* 289 (2000), July, Nr. 5476, S. 98–101. <http://dx.doi.org/DOI: 10.1126/science.289.5476.98>. – DOI DOI: 10.1126/science.289.5476.98
- [72] LEE, S. J. ; LEE, C. Y. ; YANG, K. T. ; KUAN, F. H. ; LAI, P. H.: Simulation and fabrication of micro-scaled flow channels for metallic bipolar plates by the electrochemical micro-machining process. In: *Journal of Power Sources* 185 (2008), Nr. 2, S. 1115–1121. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jpowsour.2008.07.087>. – DOI 10.1016/j.jpowsour.2008.07.087
- [73] JO, C. H. ; KIM, B. H. ; CHU, C. N.: Micro electrochemical machining for complex internal micro features. In: *Cirp Annals-manufacturing Technology* 58 (2009), Nr. 1, S. 181–184. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2009.03.072>. – DOI 10.1016/j.cirp.2009.03.072
- [74] KIRCHNER, V. ; XIA, X. H. ; SCHUSTER, R.: Electrochemical nanostructuring with ultrashort voltage pulses. In: *Accounts of Chemical Research* 34 (2001), Nr. 5, S. 371–377. <http://dx.doi.org/10.1021/ar000133p>. – DOI 10.1021/ar000133p
- [75] FORSTER, R. ; SCHOTH, A. ; MENZ, W.: Micro-ECM for production of microsystems with a high aspect ratio. In: *Microsystem Technologies-micro-and Nanosystems-information Storage and Processing Systems* 11 (2005), Nr. 4-5, S. 246–249. <http://dx.doi.org/10.1007/s00542-004-0374-7>. – DOI 10.1007/s00542-004-0374-7
- [76] KIM, B.H. ; NA, C.W. ; LEE, Y.S. ; CHOI, D.K. ; CHU, C.N.: Micro Electrochemical Machining of 3D Micro Structure Using Dilute Sulfuric Acid. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 54 (2005), Nr. 1, 191 - 194. [http://dx.doi.org/DOI: 10.1016/S0007-8506\(07\)60081-X](http://dx.doi.org/DOI: 10.1016/S0007-8506(07)60081-X). – DOI DOI: 10.1016/S0007-8506(07)60081-X. – ISSN 0007-8506
- [77] KIM, B. H. ; RYU, S. H. ; CHOI, D. K. ; CHU, C. N.: Micro electrochemical milling. In: *Journal of Micromechanics and Microengineering* 15 (2005), Nr. 1, S. 124–129. <http://dx.doi.org/10.1088/0960-1317/15/1/019>. – DOI 10.1088/0960-1317/15/1/019

- [78] PARK, M. S. ; CHU, C. N.: Micro-electrochemical machining using multiple tool electrodes. In: *Journal of Micromechanics and Microengineering* 17 (2007), Nr. 8, S. 1451–1457. <http://dx.doi.org/10.1088/0960-1317/17/8/006>. – DOI 10.1088/0960-1317/17/8/006
- [79] BHATTACHARYYA, B.: Recent developments in electrochemical micro machining / Jadavpur University. Kolkata, India, 2007. – Forschungsbericht
- [80] DE SILVA, A. K. M. ; MCGEOUGH, J. A.: Process monitoring of electrochemical micromachining. In: *Journal of Materials Processing Technology* 76 (1998), Nr. 1-3, S. 165–169
- [81] MUNDA, J. ; MALAPATI, M. ; BHATTACHARYYA, B.: Control of micro-spark and stray-current effect during EMM process. In: *Journal of Materials Processing Technology* 194 (2007), S. 151–158. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matprotec.2007.04.112>. – DOI 10.1016/j.matprotec.2007.04.112
- [82] BHATTACHARYYA, B. ; MALAPATI, M. ; MUNDA, J. ; SARKAR, A.: Influence of tool vibration on machining performance in electrochemical micro-machining of copper. In: *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 47 (2007), Nr. 2, S. 335–342. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2006.03.005>. – DOI 10.1016/j.ijmachtools.2006.03.005
- [83] YONG, L. ; Z., Yunfei. ; GUANG, Y. ; P., Liangqiang: Localized electrochemical micromachining with gap control. In: *Sensors and Actuators A - Physical* 108 (2003), Nr. 1-3, S. 144–148. [http://dx.doi.org/10.1016/S0924-4247\(03\)00371-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0924-4247(03)00371-6). – DOI 10.1016/S0924-4247(03)00371-6
- [84] RYU, S. H.: Micro fabrication by electrochemical process in citric acid electrolyte. In: *Journal of Materials Processing Technology* 209 (2009), Nr. 6, S. 2831–2837. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.06.044>. – DOI 10.1016/j.jmatprotec.2008.06.044
- [85] SCHÖNEBERGER, I. ; ROY, S.: Microscale pattern transfer without photolithography of substrates. In: *Electrochimica Acta* 51 (2005), S. 809–819. <http://dx.doi.org/doi:10.1016/j.electacta.2005.04.053>. – DOI doi:10.1016/j.electacta.2005.04.053
- [86] ROY, S.: Fabrication of micro- and nano-structured materials using mask-less processes. In: *Journal of Physics D: Applied Physics* 40 (2007), Nr. 22, S. R413–R426. <http://dx.doi.org/10.1088/0022-3727/40/22/R02>. – DOI 10.1088/0022-3727/40/22/R02
- [87] LIDE, David R.: *CRC Handbook of Chemistry and Physics: Ready-reference Book of Chemical and Physical Data*. Bd. 84. CRC Press, 2004
- [88] HARTNETT, James P. ; KOSTIC, Milivoje: Heat Transfer to Newtonian and Non-Newtonian Fluids in Rectangular Ducts. In: *Advances in Heat Transfer* 19 (1989)

- [89] BRUUS, Henrik: *Theoretical Microfluidics*. Oxford Master Series in Physics, 2007

Eigene Veröffentlichungen

WEINBERGER, S. ; JAKOVLEV, O. ; WINKELMANN, C. H. ; MARKWEG, E. ; HOFFMANN, M.: Development of a novel micromirror with high static rotation angle for measurement applications. In: *Proceedings 21st Micromechanics and Microsystems Europe Workshop*, Enschede, Niederlande, 2010

WINKELMANN, C. ; WOITSCHACH, O. ; MEYER, E.-M. ; LANG, W.: Development of a strain sensor for rolling contact loads. In: *Proceedings of Transducers 2011*, Peking, China, IEEE, 2011

WINKELMANN, C. ; WOITSCHACH, O. ; MEYER, E.-M. ; LANG, W.: Entwicklung eines mechanisch hoch belastbaren Sensors für Rollkontaktbeanspruchung. In: *Mikrosystemtechnik Kongress 2011*, Darmstadt, Deutschland, VDE Verlag GmbH Berlin Offenbach, 2011

DECHO, H. ; STOCK, H.-R. ; WINKELMANN, C. ; LANG, W.: Development of hydrogenated amorphous carbon thin film with high electrical resistance for use in embedded sensors in abrasive environment. In: *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* (2012), S. 1-7

WINKELMANN, C. ; LANG, W.: Influence of the electrode distance and metal ion concentration on the resulting structure in electrochemical micromachining with structured counter electrodes. In: *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 72 (2013), S. 25-31

WINKELMANN, C. ; LANG, W.: Sensorial surfaces - Embedding sensor structures into the surface of materials. In: *IEEE Sensors Journal* (2013), DOI: 10.1109/JSEN.2013.2290134

WINKELMANN, C.: Elektroden geeignet für die Herstellung von Mikro- und/oder Nanostrukturen auf Werkstoffen. *Deutsches Patentamt* (2014). DE 10 2014 102550.4. Anmeldedatum: 27. Februar 2014.

Danksagung

Die Entwicklung eines Mikro-Elektrostrukturierprozesses mit strukturierten Gegenelektroden fand während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter und Doktorand am Institut für Mikrosensoren, -aktoren und -systeme (IMSAS) an der Universität Bremen statt.

Meinem Doktorvater Herrn Professor Dr. Lang danke ich herzlich für die hervorragende Betreuung in diesen Jahren mit den zahlreichen Diskussionen und Rückmeldungen zu meiner Arbeit. Er eröffnete mir die Möglichkeiten, die sich mit sensorischen Oberflächen und Materialien in Zukunft ergeben werden. Herrn Professor Dr. Vellekoop danke ich herzlich für die Übernahme der Zweitgutachterschaft und das Interesse an meiner Arbeit. Beiden Professoren danke ich ausdrücklich für die Unterstützung bei der Vorbereitung meiner beruflichen Selbstständigkeit.

Bei Herrn Professor Dr. Paul und Herrn Professor Dr. Zoch bedanke ich mich herzlich für die Übernahme der Prüfertätigkeit während meines Promotionskolloquiums.

Besonderer Dank gilt meinen ehemaligen Kolleginnen und Kollegen am IMSAS. Dies gilt insbesondere Frank Jakobs, Azat Ibragimov und Ole Woitschach, mit denen ich ein Büro teilte. In den zahlreichen Diskussionen reiften und gediehen unsere Ideen. Frank danke ich für seine Freundschaft und das Korrekturlesen meiner Veröffentlichungen und dieser Arbeit. Ole danke ich für die Hilfe bei der Entwicklung der elektrischen Schaltungen und der Konzeptionierung der Messtechnik. Azat danke ich für sein Feedback zu den theoretischen Überlegungen. Ich habe die Zeit in unserem gemeinsamen Büro sehr genossen und werde sie immer in besonderer Erinnerung behalten.

Weiterhin bedanke ich mich bei allen wissenschaftlichen und technischen Mitarbeitern für ihre Unterstützung und den tollen kollegialen Zusammenhalt. Besonders hervorheben möchte ich an dieser Stelle Kai Syrnik, Eileen Ritter, Christian Habben, André Bödecker und Eva-Maria Meyer für ihre Unterstützung bei der technologischen Umsetzung sowie Gerrit Dumstorff, Lukas Brandhoff, Eike Brauns und Thomas Hertzberg für die zahlreichen Gespräche zur Entwicklung und Simulation.

Weiterhin danke ich der Stiftung der Deutschen Wirtschaft (sdw) für ihre Unterstützung und Förderung. Herzlichen Dank an die Bremer Stipendiatengruppe mit den tollen Seminaren. Herrn Professor Dr. Wilhelm und Herrn Kramer danke ich für die zahlreichen, gemeinsam durchgeführten Auswahlgespräche sowie die erheiternden und erhellenden Diskussionen zu später Stunde.

Mein größter Dank geht an meine Familie. Meinen Eltern danke ich für die beispielhafte Unterstützung aller meiner Vorhaben. Meiner Frau Jette und meinem Sohn Henri danke ich für ihre Liebe und moralische Unterstützung bei der Anfertigung dieser Arbeit.

Oldenburg, im Februar 2014
Cord Winkelmann